



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΟΚΙΜΑΣΤΗΡΙΟΥ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Διπλωματική Εργασία

Ι. Γ. Κουκουράκης



Επιβλέπων Καθηγητής : Χ. Α. Φραγκόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Περιεχόμενα

1.	Σύντομη παρουσίαση τεχνολογιών των κυψέλων καυσίμου	
1.1	Εισαγωγή	5
1.2	Σύντομο Ιστορικό	6
1.3	Συνοπτική περιγραφή τύπων κυψελών καυσίμου	8
1.4	Κυψέλες καυσίμου Πολυμερικής Μembrάνης (PEMFC)	10
1.5	Εφαρμογές κυψελών καυσίμου	15
1.6	Πλεονεκτήματα –μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου	18
1.7	Αντιστρεπτή ηλεκτρεγερτική δύναμη και μέγιστος βαθμός απόδοσης κυψέλης καυσίμου	20
1.8	Τάση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου-Υπολογισμός απωλειών τάσης	25
2.	Περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου	
2.1	Υπολογισμός μερικής πίεσης υδρατμού στις διόδους ροής	34
2.2	Υπολογισμός ενεργών τιμών μερικών πιέσεων αντιδρώντων στην επιφάνεια του καταλύτη	36
2.3	Υπολογισμός Θεωρητικού δυναμικού και απωλειών δυναμικού	38
2.4	Ισολογισμός μάζας και ενέργειας	40
2.5	Δομή μοντέλου	45
3.	Περιγραφή δοκιμαστηρίου κυψελών καυσίμου	
3.1	Γενικά στοιχεία δοκιμαστηρίου	49
3.2	Χώρος της προς δοκιμή κυψέλης καυσίμου	50
3.3	Εσωτερικός πίνακας συνδέσεων	51
3.4	Εξωτερικός πίνακας συνδέσεων	53
3.5	Πίνακας ελέγχου	54
3.6	Κυψέλη καυσίμου	57
3.7	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής και UPS	58

4.	Πειραματικά αποτελέσματα από τη χρήση του δοκιμαστηρίου	
4.1	Προθέρμανση	62
4.2	Πείραμα παροχής αντιδρώντων αερίων – Πείραμα αέρα	65
4.3	Πείραμα παροχής αντιδρώντων αερίων – Πείραμα υδρογόνου	78
4.4	Πείραμα θερμοκρασιών συστοιχίας	86
4.5	Πείραμα πιέσεων	94
4.6	Πείραμα θερμοκρασιών ανόδου	103
4.7	Πείραμα θερμοκρασιών καθόδου	112
4.8	Πειράματα προδιαγεγραμμένα από τον μελετητή	120
5.	Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο	
5.1	Πρώτη ομάδα διαγραμμάτων (Air=400 ml/min, H ₂ =200 ml/min)	126
5.2	Δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων (Air=3 st, H ₂ =2 st, TVN data)	134
5.3	Τρίτη ομάδα διαγραμμάτων (Air=3 st, H ₂ =2 st) - custom experiment	140
6.	Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για την συνέχιση και βελτίωση της εργασίας	
6.1	Γενικά συμπεράσματα	149
6.2	Προτάσεις για συνέχιση και βελτίωση της εργασίας	150

Κεφάλαιο 1

Σύντομη παρουσίαση τεχνολογιών κυψελών
καυσίμου

1.1 Εισαγωγή

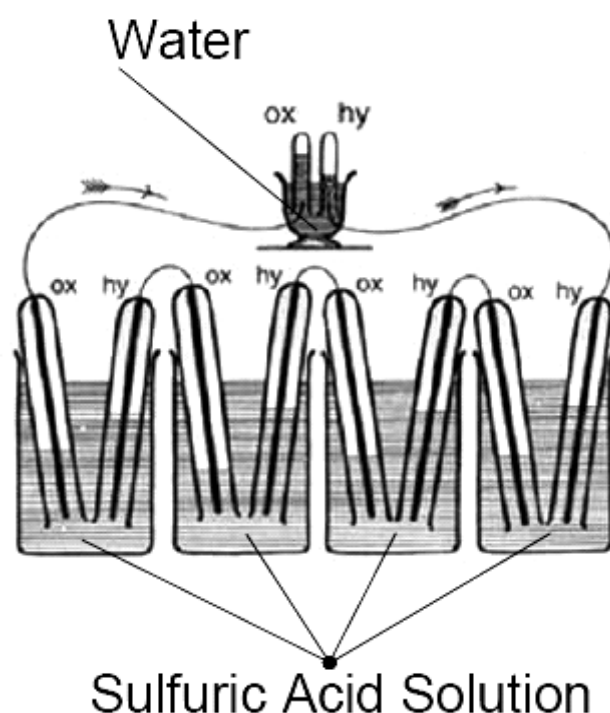
Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου είναι μια τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που υπάρχει και εξελίσσεται εδώ και περίπου 150 χρόνια από την εφεύρεση της πρώτης κυψέλης καυσίμου το 1839. Αυτή η μακρά περίοδος χαρακτηρίστηκε από βελτιώσεις και διάφορα τεχνολογικά προβλήματα κατά την εξέλιξή της. Αυτή η μακριά περίοδος εξέλιξης, χωρίς βέβαια αρχικά εκτεταμένη εξάπλωση στο πεδίο των εμπορικών εφαρμογών μεγάλης κλίμακας, δεν είναι παρά μια ξεχωριστή περίπτωση για τέτοιου είδους εφεύρεση, ίσως προδιαγράφοντας και την ιδιαιτερότητά της. Από νωρίς άρχισε να διαφαίνεται η δυνατότητα των κυψελών υδρογόνου να παράγουν με ένα αποτελεσματικό τρόπο ηλεκτρική ενέργεια μέσω της οξείδωσης καυσίμου. Υπάρχουν διάφορα είδη κυψελών καυσίμου καθένα από τα οποία έχει τη δική του ιστορία και εξέλιξη καθώς και διάφορες εμπορικές εφαρμογές. Μόνο ένας τύπος κυψέλης καυσίμου τελικά δεν εξελίχθηκε περαιτέρω η κυψέλη καυσίμου με άνθρακα για καύσιμο (Direct Coal FC).

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιαστεί ένα σύντομο ιστορικό των κυψελών καυσίμου και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους καθώς και θα καταγραφούν οι εξισώσεις που διέπουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία τους. Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι κύριοι τύποι των κυψελών καυσίμου δίνοντας βάση στον υπό μελέτη τύπο, τις κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEM). Τέλος θα παρουσιαστούν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας όπως διαφαίνονται από τις μέχρι τώρα επιστημονικές εξελίξεις, καθώς και θα παρουσιαστούν ενδεικτικά μερικές εφαρμογές στον τομέα της Ναυτικής Μηχανολογίας.

1.2 Σύντομο ιστορικό

Σύντομη Ιστορική αναδρομή

Οι βασικές αρχές της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου ανακαλύφθηκαν από τον Γερμανό επιστήμονα, καθηγητή του πανεπιστημίου της Βασιλείας, Christian Frierdrich Schonbein το 1838 και δημοσιεύτηκαν σε ένα επιστημονικό περιοδικό της εποχής. Σε αυτές τις αρχές βασίστηκε ο Ουαλός επιστήμονας και δικηγόρος Willian Robert Grove και παρουσίασε τον Φεβρουάριο του 1839 την πρώτη κυψέλη καυσίμου στο περιοδικό *Philosophical Magazine and Journal of Science*. Η κυψέλη αυτή χρησιμοποιούσε τα ίδια υλικά με τις σημερινές κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (phosphoric acid fuel cell).



Εικ. 1.1 Σχέδιο της πρώτης κυψέλης καυσίμου.

Παρόλο που η δυνατότητα των κυψελών υδρογόνου για αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίστηκε από την αρχή, τεχνικά προβλήματα που παρέμεναν άλυτα επί σχεδόν 150 χρόνια, δεν επέτρεψαν στις συσκευές αυτές να εφαρμοστούν ευρέως στην πράξη. Σε ερευνητικό και επιστημονικό επίπεδο η πρόοδος συνεχίστηκε με αποτέλεσμα πλήθος εφευρέσεων και διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σε χώρες της Ευρώπης, των Η.Π.Α., στην Ιαπωνία και αλλού.

Η πρώτη περιγραφή αλκαλικής κυψέλης καυσίμου εμφανίζεται το 1902 από τον J.H. Reid. Το επόμενο διάστημα η έρευνα στις κυψέλες καυσίμου κατευθύνθηκε προς την κατασκευή κυψελών καυσίμου με καύσιμο τον άνθρακα, μιας και αυτός ήταν το κύριο καύσιμο της εποχής, χωρίς μεγάλη επιτυχία και τελικά δεν κατάφεραν να περάσουν στο στάδιο των εμπορικών εφαρμογών. Η έρευνα συνεχίστηκε τα επόμενα χρόνια με διάφορες

παραλλαγές-συνδυασμούς σε καύσιμα, ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόδια. Παρά τις ερευνητικές προσπάθειες, μέχρι και το 1940 οι κυψέλες καυσίμου παρέμειναν σε μικρό μέγεθος, η διάρκεια ζωής τους ήταν μικρή και δεν ξεπέρασαν το ερευνητικό στάδιο.

Το πέρασμα από την επιστημονική έρευνα στην εφαρμοσμένη άρχισε με τον F.T. Bacon από τη Μ. Βρετανία, ο οποίος το 1939 κατασκεύασε κυψέλη καυσίμου αμφίδρομης λειτουργίας με διάλυμα KOH ως ηλεκτρολύτη και με λειτουργικά χαρακτηριστικά : πίεση αερίων 220 bar, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος 13 mA/cm^2 , και μέγιστη τάση 0,89 V.

Το 1955 ο W. Thomas Grubb, ένας μηχανικός που εργαζόταν για την εταιρεία General Electric, εξέλιξε περαιτέρω το αρχικό σχέδιο της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων από θειώδες πολυστυρένιο (sulphonated polystyrene) ως ηλεκτρολύτη. Τρία χρόνια μετά, ένας άλλος χημικός που εργάζονταν στην ίδια εταιρεία, ο Leonard Niedrach, ανακάλυψε έναν τρόπο για να τοποθετεί την πλατίνα στη μεμβράνη, κάτι το οποίο λειτουργεί σαν καταλύτης για την απαιτούμενη οξείδωση του υδρογόνου και την μείωση των ενώσεων του οξυγόνου στις αντιδράσεις. Αυτή έγινε γνωστή ως κυψέλη καυσίμου Grubb-Niedrach. Η εταιρεία GE συνέχισε να αναπτύσσει αυτή την τεχνολογία με τη NASA και την Mc Donnell Aircraft, οδηγώντας στη χρησιμοποίηση της από το διαστημικό πρόγραμμα Gemini. Αυτή ήταν και η πρώτη εμπορική εφαρμογή κυψέλης καυσίμου. Μέχρι το 1959 ο Βρετανός μηχανικός Francis Thomas Bacon επιτυχώς ανέπτυξε μια κυψέλη καυσίμου 5 kW. Το 1959, μια επιστημονική ομάδα καθοδηγούμενη από τον Harry Ihrig κατασκεύασε μια κυψέλη καυσίμου 15 kW τοποθετημένη σε ένα τρακτέρ για την εταιρεία Allis-Chalmers η οποία και επιδείχθηκε στις Η.Π.Α. σε διάφορες εκθέσεις μηχανημάτων. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιούσε υδροξείδιο του καλίου σαν ηλεκτρολύτη και συμπιεσμένο υδρογόνο και οξυγόνο σαν αντιδρώντα. Αργότερα, το 1959, ο Bacon και οι συνάδελφοί του επέδειξαν μια ενεργειακή μονάδα 5 kW, η οποία χρησιμοποιούνταν για την τροφοδότηση μιας μηχανής συγκόλλησης.

Στα 1960, ο Pratt και ο Whitney αδειοδότησαν τα αμερικανικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας του Bacon στις Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (alkaline fuel cells) για χρήση στο αμερικανικό διαστημικό πρόγραμμα για την τροφοδότηση των διαστημοπλοίων με νερό και ηλεκτρισμό. Με στόχο τη μείωση του βάρους και με την προοπτική του σχεδιασμού μιας κυψέλης καυσίμου με μεγαλύτερη αντοχή στον χρόνο σε σχέση με το σχέδιο κυψέλης καυσίμου GE πολυμερικής μεμβράνης (PEM fuel cell), ο Pratt και ο Whitney βελτίωσαν το αρχικό σχέδιο του Bacon. Σαν αποτέλεσμα αυτού, οι Pratt και Whitney κέρδισαν συμβόλαιο με τη NASA για να της παρέχουν αυτές τις κυψέλες για το διαστημικό πρόγραμμα Apollo. Οι αλκαλικές κυψέλες έχουν από τότε χρησιμοποιηθεί σχεδόν σε όλες τις επανδρωμένες αμερικανικές διαστημικές αποστολές συμπεριλαμβανομένων και εκείνων των διαστημικών λεωφορείων.

Κατά τη δεκαετία του '70, η τεχνολογία κυψελών καυσίμου αναπτύχθηκε και για χερσαία ενεργειακά συστήματα. Οι πετρελαϊκές κρίσεις του 1973 και 1979 βοήθησαν στην ανάπτυξη αυτών των συστημάτων, ενώ οι Η.Π.Α. επένδυσαν στην επιστημονική έρευνα στις κυψέλες καυσίμου σαν μια προσπάθεια να εισάγουν στην ενεργειακή τους πολιτική τις τεχνολογίες του υδρογόνου.

Μια σειρά από επιχειρήσεις και κυβερνητικοί οργανισμοί διεξήγαγαν επιστημονική έρευνα με σκοπό να ξεπεραστούν τα τεχνολογικά εμπόδια-προβλήματα που παρουσιάζει αυτή η τεχνολογία. Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1970-1980 μεγάλη επιστημονική

έρευνα κατευθύνθηκε στην ανάπτυξη υλικών κατάλληλων, με γνώμονα βέβαια την εύρεση της βέλτιστης ενεργειακής πηγής, και στη δραστική μείωση του κόστους της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, η τεχνολογία κυψελών καυσίμου άρχισε να δοκιμάζεται από εργοστασιακές μονάδες και εταιρείες κατασκευής αυτοκινήτων. Τεχνολογικά βήματα συνέβησαν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας αυτής, συμπεριλαμβανομένου και του πρώτου εμπορικού αυτοκινήτου το 1993 από την Καναδική εταιρεία κατασκευής κυψελών καυσίμου Ballard.

Σήμερα, χώρες όπως οι Η.Π.Α. και η Ιαπωνία έχουν εγκαταστήσει κυψέλες υδρογόνου σε σχολεία και νοσοκομεία. Το αμερικανικό ινστιτούτο άμυνας έχει υποστηρίξει την εγκατάσταση 30 συστοιχιών κυψελών καυσίμου τύπου PAFC ισχύος 200 kW η καθεμία για να δοκιμάσει την εφαρμογή τους σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος και να προωθήσει την εμπορική χρησιμοποίησή τους. Τυποποιημένες μονάδες μεγέθους 200-250 kW είναι εμπορικά διαθέσιμες στην αγορά για στατικές εφαρμογές και λειτουργούν συνήθως με φυσικό αέριο. Αξιόλογη προσπάθεια κατευθύνεται στην ανάπτυξη κυψελών καυσίμου κυρίως πολυμερικής μεμβράνης (PEM) για την κίνηση αυτοκινήτων, ενώ λεωφορεία που κινούνται με κυψέλες καυσίμου έχουν δοκιμαστεί πειραματικά στο Σικάγο και το Βανκούβερ που αναμένουν να παραγγείλουν τέτοια οχήματα στο άμεσο μέλλον, καθώς και σε ευρωπαϊκές πόλεις (Αμβούργο κ.α.).

1.3 Συνοπτική περιγραφή τύπων κυψελών καυσίμου

Στην συνέχεια θα ακολουθήσει μια συνοπτική περιγραφή των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου, αναφέροντας κάποια γενικά στοιχεία και τέλος θα γίνει μια παρουσίαση των κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης που είναι και το αντικείμενο μελέτης μας.

Αλκαλικές Κυψέλες καυσίμου

Η αλκαλικές κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο και οξυγόνο ή αέρα ως οξειδωτικό. Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα οξειδίου του καλίου (KOH), με περιεκτικότητα γύρω στο 30%, που είναι βέλτιστη από πλευρά αγωγιμότητας. Η επιλογή του KOH οφείλεται στο ότι αυτό είναι το πλέον αγωγίμο από όλα τα αλκαλικά υδροξείδια. Αγωγάμοι φορείς μέσα στον ηλεκτρολύτη είναι τα ιόντα υδροξυλίου (OH⁻). Αν και το νερό παράγεται στην άνοδο, υπάρχει κάποια μετακίνηση προς την κάθοδο, οπότε το νερό βγαίνει κατά τα 2/3 από την άνοδο και περίπου κατά 1/3 από την κάθοδο. Το πλεονέκτημα αυτών των κυψελών είναι ότι δεν απαιτούν ευγενή μέταλλα για τα ηλεκτρόδια. Οι αλκαλικές κυψέλες έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε διαστημικά ταξίδια και επίσης θεωρούνται κατάλληλες για χρήση στον τομέα των μεταφορών. Στόχος για τη χρησιμοποίηση στον τομέα των μεταφορών είναι η πτώση του κόστους στα περίπου 100 \$/kW ενώ για άλλες εφαρμογές κόστος της τάξης του 500 \$/kW μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό.

Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως λειτουργούν με υδρογόνο που προέρχεται κυρίως από αναμόρφωση οργανικών καυσίμων, όπως υδρογονανθράκων (κυρίως φυσικού αερίου) και αλκοολών με ατμό. Καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι κοντά στους 200°C, η αποβαλλόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα για τη παραγωγή του ατμού αναμόρφωσης ή για την κάλυψη των θερμικών αναγκών. Τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από άνθρακα με επικάλυψη πλατίνας ως καταλύτη. Τα θετικά του φωσφορικού οξέως σε σύγκριση με τα άλλα οξέα που έχουν δοκιμαστεί είναι (α) η σταθερότητα στο ηλεκτροχημικό περιβάλλον σε θερμοκρασίες τουλάχιστον μέχρι 225°C, (β) η καλή αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασίες πάνω από 150°C, και (γ) η αποτελεσματική απομάκρυνση του παραγόμενου νερού και της εκλυόμενης θερμότητας. Λειτουργούν σε θερμοκρασίες 150°C-190°C και σε πίεση ατμοσφαιρική ή και λίγο μεγαλύτερη.

Θεωρούνταν την δεκαετία του '90 από πλευράς παραγωγής και διάδοσης ο πιο ώριμος τύπος κυψέλης καυσίμου, εν τούτοις τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να υποχωρεί το έντονο ενδιαφέρον για την χρήση τους και να στρέφεται προς άλλους τύπους. Οι μονάδες που κατασκευάζονται προορίζονται για επί τόπου παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (συμπαγωγή) που εξυπηρετούν συνήθως τις ανάγκες μεγάλων κτηρίων. Προσφέρονται συνήθως σε τυποποιημένες μονάδες ισχύος 200-250 kW με κόστος 2800-3000 \$/kW.

Κυψέλες καυσίμου Τηγμένων Ανθρακικών Αλάτων

Στον τύπο αυτό κυψέλης, ως καύσιμο χρησιμοποιείται αέριο μίγμα με συστατικά H₂, CO και CO₂ το οποίο μπορεί να προέρχεται από αναμόρφωση υδρογονανθράκων (κυρίως φυσικού αερίου) ακόμη και αεριοποίηση άνθρακα. Το CO₂ που βρίσκεται στην άνοδο, μεταφέρεται στην κάθοδο και καταναλίσκεται. Η άνοδος κατασκευάζεται από κράμα νικελίου-χρωμίου, η κάθοδος κατασκευάζεται από πορώδες σύμπλοκο λιθίου και ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από μίγμα τηγμένων ανθρακικών αλάτων. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτών των κυψελών είναι 600-700°C. Κατά την λειτουργία της παράγεται χρήσιμη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την εξυπηρέτηση αναγκών θέρμανσης αλλά και για τη πρόσθετη παραγωγή ηλεκτρισμού. Προορίζονται κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές μέσης ή μεγάλης κλίμακας (της τάξης των MW), καθώς και για μονάδες βάσης των εταιρειών ηλεκτρισμού με αναμενόμενο βαθμό απόδοσης υψηλότερο τους 50% ή 60%. Από πλευράς κόστους, στόχος είναι η μείωσή του στα 1000-1500 \$/kW.

Κυψέλες καυσίμου Στερεού Οξειδίου

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου αποτελείται αποκλειστικά από στερεά σώματα. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται είτε H₂ είτε μίγμα H₂ και CO το οποίο προέρχεται από

αναμόρφωση υδρογονανθράκων ή αεριοποίηση άνθρακα. Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από στρώμα κεραμικού υλικού, συνήθως οξειδίου του ζirkονίου εμπλουτισμένου με ύτρια, η άνοδος κατασκευάζεται από πορώδες $Ni-ZrO_2$ ενώ η κάθοδος από $La_xSr_{1-x}MnO_3$. Οι κυψέλες αυτές λειτουργούν σε θερμοκρασία 950-1000⁰C και πίεση μέχρι 15 atm.

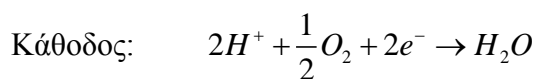
Η λειτουργία είναι εξαιρετικά πλεονεκτική όταν η κυψέλη καυσίμου συνδυάζεται με αεροστρόβιλο για πρόσθετη παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ισχύος. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας κάνει τις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου κατάλληλες για συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού στον κτηριακό και κυρίως στον βιομηχανικό τομέα. Από πλευράς κόστους ο στόχος είναι η μείωση στα 1000-1500 \$/kW.

1.4 Κυψέλες καυσίμου Πολυμερικής Μembrάνης (PEMFC)

Για τις κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης γίνεται ιδιαίτερη αναφορά και ανάλυση όπως θα δειχτεί στην συνέχεια, λόγω του ότι αποτελούν το αντικείμενο μελέτης μας. Το δοκιμαστήριο κυψελών καυσίμου, στο οποίο έχει βασιστεί και αυτή η διπλωματική εργασία, διαθέτει μια συστοιχία από τρεις κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης. Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία αυτών των κυψελών είναι αναγκαία μια περιγραφή και θεωρητική διερεύνηση.

Γενικά στοιχεία

Η κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης λειτουργεί με υδρογόνο και οξυγόνο και οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι ακόλουθες:



Η αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου πραγματοποιείται στην άνοδο και απελευθερώνονται 2 ηλεκτρόνια, τα οποία οδεύουν προς την κάθοδο μέσω του εξωτερικού φορτίου, αποτελώντας το παραγόμενο ρεύμα. Τα κατιόντα υδρογόνου που σχηματίζονται διέρχονται μέσω του πολυμερικού ηλεκτρολύτη και καταλήγουν στην κάθοδο. Ο πολυμερικός ηλεκτρολύτης είναι από τέτοιο υλικό που να έχει ελεύθερα ιόντα, ανήκει δε στη γενική κατηγορία των υλικών τα οποία λέγονται μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane). Στην κάθοδο παράγεται νερό το οποίο είναι το αποτέλεσμα αυτής της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης αποτελούνται εξολοκλήρου από στερεά σώματα. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται πολυμερική μεμβράνη, συνήθως από PTFE (polytetrafluoroethylene) μια ειδική κατηγορία πολυμερών. Γνωστότερο από αυτά

είναι το υλικό με εμπορική ονομασία Nafion (Dupont), το οποίο υπάρχει και εξελίσσεται από την δεκαετία του 1960 και την χρησιμοποίησή του σε εφαρμογές σε διαστημικά προγράμματα. Αυτά τα πολυμερή παράγονται με ειδικές διεργασίες, κατά τις οποίες τα βασικά πολυμερή (πχ αιθυλένιο) μεταλλάσσονται με την αντικατάσταση στην αλυσίδα του μορίου του υδρογόνου με φθόριο. Αυτά τα πολυμερή, μετά από την επεξεργασία που υφίστανται αποκτούν τις ιδιότητες που τα κάνουν ιδανικά υλικά για χρήση σε κυψέλες καυσίμου.

Αυτές οι ιδιότητες είναι :

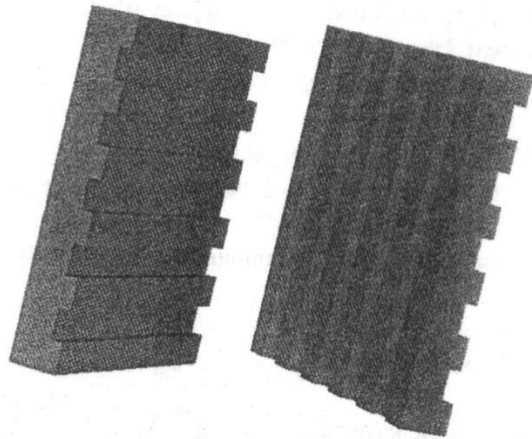
- Μεγάλη χημική ανθεκτικότητα
- Μεγάλη μηχανική αντοχή που δίνει τη δυνατότητα να διαμορφωθούν σε πολύ λεπτά φύλλα πάχους μικρότερου από 50μm
- Μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες νερού
- Όταν έχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας, καθίστανται καλοί αγωγοί των πρωτονίων.

Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως από πορώδη άνθρακα και επικαλύπτονται από στρώμα πλατίνας, η οποία λειτουργεί ως καταλύτης στις ηλεκτροχημικές διεργασίες. Η πλατίνα είναι ο καλύτερος καταλύτης ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και προστίθεται σε ποσότητες περίπου (περιεκτικότητα 10-20%) $0,2 \text{ mg/cm}^2$ εν συγκρίσει με τις ποσότητες των περίπου 28 mg/cm^2 που τοποθετούνταν πριν μερικές δεκαετίες. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται με μια ιδιαίτερη μικροδομή επεξεργασμένα με διάφορες μεθόδους, συνήθως με ακτίνες laser, ώστε να αποκτήσουν μια πορώδη επιφάνεια, η οποία αυξάνει και την τελική ενεργό επιφάνεια στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Έτσι η τελική ενεργός επιφάνεια είναι εκατοντάδες ή χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική επιφάνεια χαρακτηριστικό το οποίο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα των αντιδράσεων και επομένως στην ένταση του παραγόμενου ρεύματος.

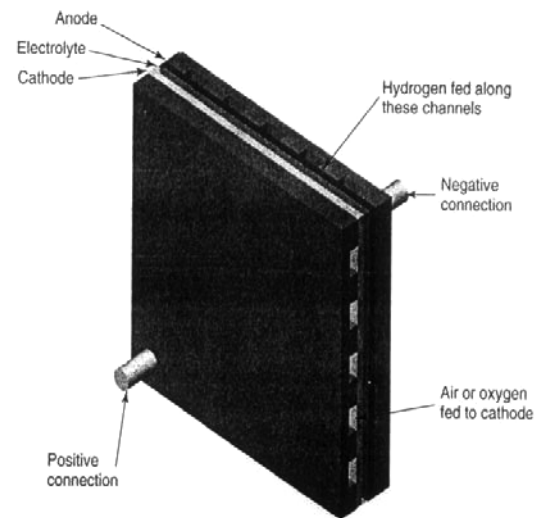
Σύνδεση κυψελών καυσίμου-δίπολη πλάκα

Μια μόνο κυψέλη αναπτύσσει χαμηλή ηλεκτρική τάση (η πραγματική τάση είναι περίπου 0,7 V). Η σύνδεση πολλών κυψελών σε σειρά επιτρέπει την παραγωγή οποιασδήποτε επιθυμητής τάσης ενώ η σύνδεση σε παράλληλη διάταξη δίνει την επιθυμητή ισχύ. Μια ομάδα κυψελών συνδεδεμένων σε σειρά, λέγεται στήλη (stack).

Η σύνδεση μεταξύ των κυψελών θα μπορούσε να γίνει με αγωγούς, αλλά τότε όλα τα ηλεκτρόνια από το κάθε ηλεκτρόδιο θα έπρεπε να συγκεντρώνονται σε μια ακμή, με αποτέλεσμα σημαντική πτώση τάσης. Για να περιοριστεί στο ελάχιστο η πτώση τάσης από την κίνηση των ηλεκτροδίων στα ηλεκτρόδια, χρησιμοποιείται η δίπολη πλάκα (bipolar plate). Με αυτήν, επιτυγχάνεται επαφή σε όλη την επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης και της ανόδου της επόμενης (γι' αυτό ονομάζεται και δίπολη πλάκα). Ταυτόχρονα, η δίπολη πλάκα είναι έτσι διαμορφωμένη, ώστε να παίζει το ρόλο διανομέα-τροφοδότη οξυγόνου στην κάθοδο και καυσίμου στην άνοδο (Εικ. 1.4, Εικ 1.5).



Εικ. 1.3. Δίπολες Πλάκες κυψέλης καυσίμου [Larminie J. and Dicks A. (2003)].



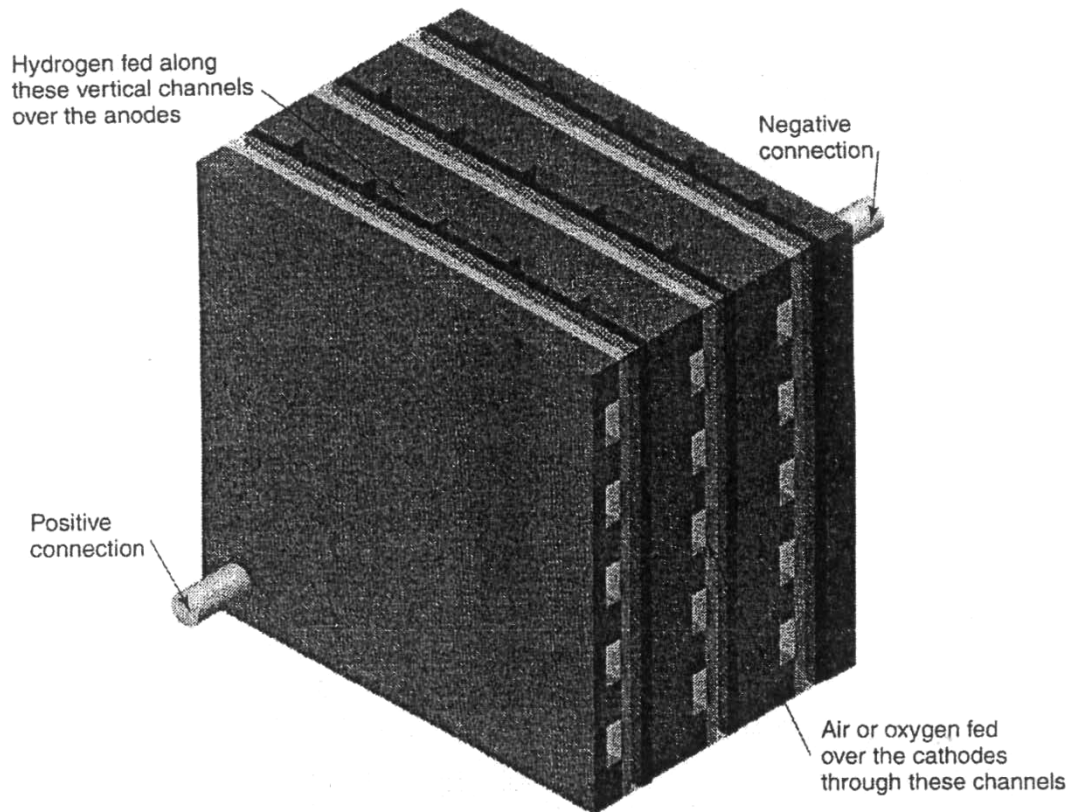
Εικ. 1.4. Σύνδεση πλακών σε μια κυψέλη καυσίμου

[Larminie J. and Dicks A. (2003)].

Στην Εικ. 1.5. δείχνει πώς συνδέονται μεταξύ τους τρεις ή περισσότερες κυψέλες σχηματίζοντας μια στήλη (συστοιχία κυψελών). Μεταξύ δυο κυψελών καυσίμου παρεμβάλλεται μια δίπολη πλάκα, ενώ στα άκρα της στήλης τοποθετούνται πλάκες που έχουν αυλακώσεις στη μια πλευρά και έναν πόλο στην άλλη πλευρά τους, για τη σύνδεση με άλλες στήλες ή με το εξωτερικό κύκλωμα. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται μια αρκετά στιβαρή στήλη. Πρέπει να αναφερθεί ότι η μορφή της δίπολης πλάκας είναι περίπλοκη και απαιτεί δύσκολη σχεδιαστική μελέτη καθώς αποτελεί συγκερασμό αντικρουόμενων απαιτήσεων, όπως μικρή αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά και στη ροή των αερίων.

Κεφάλαιο 1: Σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κατασκευή του κιβωτίου που περιέχει την συστοιχία των κυψελών καθώς θα πρέπει να είναι στεγανό (να μην υπάρχουν διαρροές αερίων), στιβαρό και με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η ψύξη του συστήματος. Επιμέρους στεγανοποιήσεις πραγματοποιούνται σε κάθε κυψέλη ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαρροές καυσίμου.



Εικ. 1.5. Σύνδεση κυψελών σε συστοιχία κυψελών καυσίμου. [Larminie J. and Dicks A. (2003)].

Συνθήκες λειτουργίας

Πίεση-Θερμοκρασία-υγρασία

Το άνω όριο της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης εξαρτάται από την θερμική σταθερότητα και τα χαρακτηριστικά αγωγιμότητας της μεμβράνης. Για το υλικό με την εμπορική ονομασία Nafion που πρωτοχρησιμοποιήθηκε στα διαστημόπλοια Gemini, το όριο αυτό είναι 85°C, ενώ στα νεότερα υλικά μπορούν να φτάσουν τους 95-105°C. Χάρη στην χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, οι κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης έχουν μικρό χρόνο εκκίνησης.

Μικρές μονάδες λειτουργούν συνήθως με ατμοσφαιρική πίεση, ενώ μονάδες ισχύος μεγαλύτερης των 10 kW μπορούν να λειτουργούν σε μεγαλύτερη πίεση (2-8 atm). Η πίεση λειτουργίας διατηρείται η ίδια και από τις δυο πλευρές της μεμβράνης, ώστε να ελαχιστοποιείται η διαπίδυση των αερίων από την μια πλευρά στην άλλη. Η διαπίδυση μειώνει την τάση που αναπτύσσεται από την κυψέλη και αυξάνει τον κίνδυνο σχηματισμού εκρηκτικού μίγματος υδρογόνου και οξυγόνου.

Η αύξηση της πίεσης αυξάνει την συγκέντρωση ισχύος, αλλά αυξάνει και την ενέργεια που απαιτούν οι συμπιεστές. Εάν το υδρογόνο είναι αποθηκευμένο σε φιάλες υψηλής πίεσης, τότε συμπίεση χρειάζεται μόνο ο αέρας. Η συμπίεση αυξάνει την θερμοκρασία του αέρα και είναι ενδεχόμενο να χρειαστεί και ψύξη του αέρα. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή θερμοκρασία διευκολύνει την εξάτμιση του νερού. Υπάρχουν λοιπόν, ποικίλες επιδράσεις και επομένως η βέλτιστη πίεση λειτουργίας θα πρέπει να προσδιοριστεί με τεχνοοικονομική μελέτη λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής.

Ο πολυμερικός ηλεκτρολύτης χρειάζεται αρκετή υγρασία για να άγει με ικανοποιητικό βαθμό τα πρωτόνια (η αγωγιμότητα των πρωτονίων είναι ανάλογη της περιεκτικότητας σε νερό). Όμως το νερό δεν πρέπει να είναι τόσο πολύ που να «πλημμυρίζει» τα ηλεκτρόδια, τα οποία βρίσκονται σε άμεση επαφή με τον ηλεκτρολύτη, φράζοντας τους πόρους. Η διαχείριση του νερού, η τροφοδότηση των αερίων και η ψύξη, είναι προβλήματα αλληλένδετα που χρειάζονται σωστή αντιμετώπιση για την κατασκευή και λειτουργία της κυψέλης.

Εφαρμογές και οικονομικά στοιχεία

Η κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης αναπτύχθηκε πρώτα από την εταιρεία General Electric και χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα επανδρωμένα διαστημόπλοια της NASA (Πρόγραμμα Gemini). Η υψηλή απόδοση, η συγκέντρωση ισχύος, και η καλή συμπεριφορά σε μερικά φορτία σε συνδυασμό με τον στερεό ηλεκτρολύτη, κάνουν τις κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης κατάλληλες για τον τομέα των μεταφορών, είτε πρόκειται για το διάστημα είτε για οχήματα στην στεριά, είτε για υποβρύχια βαθυσκάφη και πλοία. Έχουν

ήδη ναυπηγηθεί τα πρώτα υποβρύχια με κυψέλες καυσίμου και αυτές είναι πολυμερικής μεμβράνης. Είναι επίσης κατάλληλες για εφαρμογές σε ποικίλες φορητές συσκευές, ενώ το τελευταίο διάστημα σημαντική είναι η ανάπτυξη μικρών μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με κυψέλες καυσίμου αυτού του τύπου, για εφαρμογή κυρίως σε κτήρια.

Προς το παρόν, σημαντικότερη δυσκολία είναι το κόστος τόσο των μεμβρανών όσο και των ηλεκτροδίων. Με την υψηλή συγκέντρωση ($>0,5 \text{ W/cm}^2$) που έχει επιτευχθεί, το κόστος των ηλεκτροδίων μπορεί να μειωθεί στα 30-40 \$/kW. Οι νέες τεχνολογίας μεμβράνες, κοστίζουν 60-200 \$/kW. Είναι επιτακτική ανάγκη η μείωση του κόστους των μεμβρανών στο 1/10-1/20 αυτού, προκειμένου το κόστος κεφαλαίου των κυψελών αυτών να γίνει αποδεκτό για επίγειες μεταφορές.

1.5 Εφαρμογές των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς με ισχύ από μερικά Watt μέχρι πολλά MW. Αναφέρονται σε κατηγοριοποίηση:

-Φορητές ηλεκτρονικές συσκευές όπως φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα κ.α. Το εύρος ισχύος είναι 1-100 W. Κατάλληλες είναι οι κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEM) και ιδιαίτερα εκείνες που χρησιμοποιούν μεθανόλη (DMFC). Κύρια πλεονεκτήματα ως προς τους συσσωρευτές, τους οποίους αντικαθιστούν είναι η υψηλότερη απόδοση, η υψηλότερη αποδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου και η ταχύτερη επαναφόρτιση.

-Ειδικές μικροκυψέλες αναμένεται σύμφωνα με τις προβλέψεις πολλών ερευνητών να αντικαταστήσουν τις κοινές μπαταρίες. Ως κύριο πλεονέκτημα προβάλλουν την εύκολη «επαναφόρτιση» τους μιας και δεν απαιτούν τίποτα άλλο από την επαναγόμωση τους με το αντιδρών αέριο το οποίο είναι συνήθως μεθάνιο. Η ενεργειακή πυκνότητα των νέων κυψελών καυσίμου είναι 385 Wh/L, εν συγκρίσει με τις μπαταρίες λιθίου που είναι 270 Wh/L. Παρόλα τα σύμφυτα πλεονεκτήματα δεν αναμένεται να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μπαταρίες στο άμεσο μέλλον καθώς η έρευνα συνεχίζει να εξελίσσεται και οι τεχνολογικές προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν είναι πολλές.

- Αυτοκίνητα και μονάδες συμπαραγωγής σε κατοικίες. Το εύρος ισχύος είναι 1-100 kW. Κατάλληλες κυψέλες καυσίμου είναι οι αλκαλικές (AFC), οι πολυμερικής μεμβράνης (PEM), οι φωσφορικού οξέως (PAFC) και οι στερεού οξειδίου (SOFC). Κύρια πλεονεκτήματα ως προς τις μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η υψηλή απόδοση, η χαμηλή στάθμη θορύβου και η δυνατότητα μείωσης εκπομπών ρύπων στον τόπο λειτουργίας. Διάφορα πρότυπα έχουν κατασκευαστεί από αυτοκινητοβιομηχανίες χωρίς να έχουν συναντήσει ακόμα το στάδιο της παραγωγής. Πρότυπα της Honda και της

Κεφάλαιο 1: Σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου

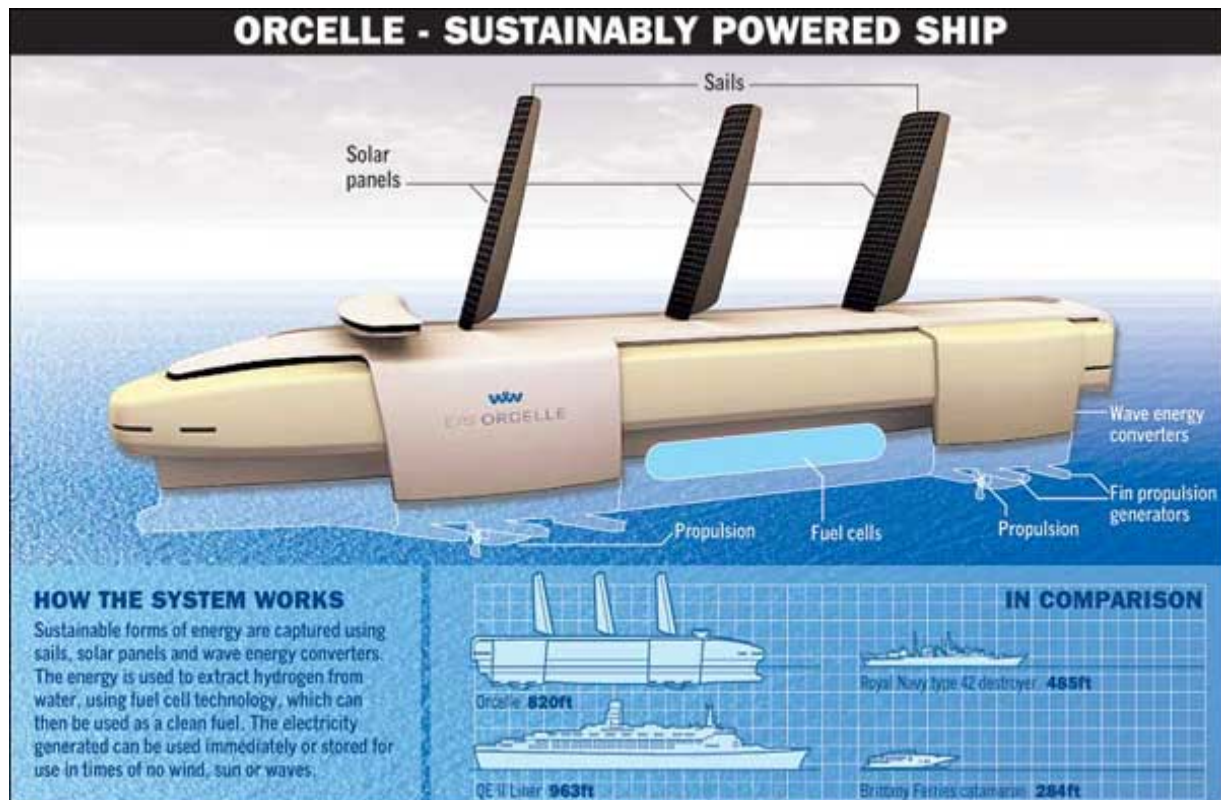
Toyota είναι τα πρώτα που κατασκευάστηκαν και παρουσιάστηκαν σε διεθνείς εκθέσεις αυτοκινήτων.

-Λεωφορεία, πλοία, τοπικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, μονάδες συμπαραγωγής του τριτογενούς και βιομηχανικού τομέα. Το εύρος της ισχύος είναι 100 kW- 10 MW. Κατάλληλες κυψέλες είναι οι πολυμερικής μεμβράνης (PEM), οι φωσφορικού οξέως (PAFC), οι τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCO) και οι στερεού οξειδίου (SOFC). Κύρια πλεονεκτήματα ως προς τα συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η υψηλή απόδοση, η χαμηλή στάθμη θορύβου και οι χαμηλές εκπομπές ρύπων. Μερικά παραδείγματα είναι :

-Το Phileas, το πρώτο λεωφορείο εκ των τεσσάρων συνολικά οχημάτων μήκους 18 μέτρων με κίνηση εξολοκλήρου με κυψέλες υδρογόνου, παραδόθηκε τον Νοέμβριο του 2008. Τα δύο παραγγέλθηκαν από την GVB, την εταιρεία δημοσίων μεταφορών του Άμστερνταμ, ενώ τα υπόλοιπα δύο από την εταιρεία RVK των τοπικών συγκοινωνιακών μεταφορών της Κολωνίας.

-Το πρότυπο NYK SUPER ECO SHIP 2030 το οποίο θεωρείται το πιο οικολογικό containership που έχει κατασκευαστεί. Παρά τα 325 m μήκους, το πλοίο αυτό καταναλώνει 20% λιγότερο καύσιμο από τα αντίστοιχα πλοία του ίδιου μήκους και παράγει 70% λιγότερους ρύπους. Για την πρόωσή του αυτό το τεράστιο πλοίο θα χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό από ηλιακή, αιολική ενέργεια και κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου που θα χρησιμοποιεί, θα είναι κυψέλες καυσίμου υδροποιημένου φυσικού αερίου και θα τίθενται σε λειτουργία όταν δεν επαρκεί η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.

-Το πρότυπο (δεν έχει ακόμα κατασκευαστεί) του 2005 E/S Orcelle της σουηδικής εταιρείας Wallenius Wilhelmsen, ένα φορτηγό πλοίο το οποίο χρησιμοποιεί μόνο ανανεώσιμες μορφές ενέργειας και φυσικά «επαναφορτιζόμενες» κυψέλες καυσίμου. Το πλοίο αυτό είναι το πρώτο βήμα για την παραγωγή του λεγόμενου *zero emission ship* (του πλοίου με μηδενικές εκπομπές ρύπων).



Εικ. 1.2 Σχέδιο προτύπου Orcelle.

-Το υποβρύχιο Παπανικολής (ένα εκ των τεσσάρων παρόμοιας κατασκευής υποβρυχίων) που κατασκευάστηκε στα ναυπηγεία Σκαρμαγκά (ΕΝΑΕ), διαθέτει το σύστημα αναερόβιας πρόωσης μια μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) που του επιτρέπει να μείνει κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για 15 ημέρες. Το υποβρύχιο διαθέτει πολλές συστοιχίες κυψελών υδρογόνου των 120 kW που χρησιμοποιεί για τις ανάγκες πρόωσης του εν καταδύσει και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

-Η βιομηχανία παρασκευής μύρας SIERRA NEVADA BREWING Co που χρησιμοποιεί ολοκληρωμένη μονάδα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού με κυψέλες υδρογόνου για τις ανάγκες της βιομηχανίας. Η εγκατάσταση, η οποία είναι από τις μεγαλύτερες στις Η.Π.Α. αποτελείται από τέσσερις μονάδες των 250 kW για να παρέχει ηλεκτρισμό και θερμότητα στη βιομηχανία.

1.6 Πλεονεκτήματα –μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάνοντάς την από τη μια πλευρά μία ελκυστική τεχνολογία από την άλλη πλευρά μια τεχνολογία με μεγάλες προκλήσεις καθώς έχει διάφορα θέματα τεχνολογικά που απαιτούν να επιλυθούν για να την καταστήσουν μια από τις πιθανές τεχνικές ενεργειακές επιλογές του μέλλοντος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας σε μια προσπάθεια να επεξηγηθεί καλύτερα αυτή ως τεχνική επιλογή για την παραγωγή ηλεκτρικής (ή θερμικής) ενέργειας και να αναδειχτούν οι γενικότερες προοπτικές της.

Πλεονεκτήματα

- Βαθμός απόδοσης. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν δυνητικά υψηλότερο βαθμό απόδοσης από εκείνον των θερμικών μηχανών. Αυτό συμβαίνει γιατί ο βαθμός απόδοσης δεν εξαρτάται από τον βαθμό απόδοσης του κύκλου του Carnot, ο οποίος αποτελεί ένα άνω όριο για όλα τα θερμικά συστήματα παραγωγής έργου. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης είναι ανεξάρτητος του μεγέθους (ισχύος) της ενεργειακής μονάδας, αυτό σημαίνει ότι μικρές μονάδες έχουν εξίσου ίδια απόδοση με μεγάλες ενεργειακές μονάδες. Ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός ακόμη και σε μερικό φορτίο, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες αυξάνεται σε μερικό φορτίο, κάτι το οποίο είναι σημαντικό για εφαρμογές όπως η κίνηση των αυτοκινήτων ή άλλου είδους τεχνικές εφαρμογές, στις οποίες στο μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους λειτουργούν σε μερικό φορτίο.
- Απλότητα του συστήματος. Τα κινούμενα μέρη είναι πολύ λίγα (μόνο τα βοηθητικά μηχανήματα της κυψέλης καυσίμου) και μικρής σχετικά ισχύος. Αυτό, συντελεί σε υψηλή αξιοπιστία και σε μικρές απαιτήσεις παρακολούθησης και συντήρησης του συστήματος.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων. Όταν καύσιμο της κυψέλης είναι το υδρογόνο, το «καυσαέριο», εννοώντας το αποτέλεσμα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης, αποτελείται μόνο από υδρατμούς. Βέβαια, εάν το υδρογόνο παράγεται με αναμόρφωση υδρογονανθράκων, τότε οι εκπομπές CO₂ δεν αποφεύγονται, αλλά είναι αισθητά χαμηλότερες χάρη στον σχετικά υψηλό βαθμό της συσκευής. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) είναι αμελητέες, διότι οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας δεν ευνοούν τον σχηματισμό τους.
- Χαμηλή Στάθμη του θορύβου. Η στάθμη του θορύβου συστημάτων με κυψέλες καυσίμου είναι πολύ χαμηλή, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία σε φορητές συσκευές, σε τοπικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ή συμπαραγωγής (πχ. εξυπηρέτηση αναγκών κτιρίων) και ειδικές εφαρμογές όπως πολεμικά υποβρύχια, κρουαζιερόπλοια κ.α. όπου απαιτείται ιδιαίτερα χαμηλή στάθμη θορύβου.

Μειονεκτήματα

- Η παραγωγή του υδρογόνου. Η παραγωγή του καυσίμου υδρογόνου, το οποίο δεν είναι διαθέσιμο ως εξορύξιμο ορυκτό, είναι ένα σημαντικό ζήτημα των κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν υδρογόνο. Μια μέθοδος είναι η αναμόρφωση υδρογονανθράκων, συνήθως φυσικού αερίου, το οποίο σημαίνει ότι απαιτούνται ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή του υδρογόνου. Για την παραγωγή του υδρογόνου με αυτή την μέθοδο παράγονται αέρια του θερμοκηπίου που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο συνολικό υπολογισμό της παραγωγής επιβλαβών αερίων. Χαρακτηριστικό είναι ότι παράγονται 9,1 κιλά διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλό υδρογόνου σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί φυσικό αέριο για την παραγωγή του. Μια άλλη μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου είναι με ηλεκτρόλυση αλλά και πάλι αυτό είναι αποτελεσματικό και ενεργειακά αποδοτικό μόνο αν η διαδικασία αυτή γίνεται με ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.
- Αποθήκευση του υδρογόνου. Όταν δεν συμπίπτει ο χρόνος και ο τόπος παραγωγής και κατανάλωσης του καυσίμου προκύπτει η ανάγκη αποθήκευσής του. Το υδρογόνο έχει χαρακτηριστικά που κάνουν την αποθήκευσή του μια αν όχι δύσκολη, ιδιαίτερη διαδικασία. Το υδρογόνο έχει πολύ μικρό μόριο και διαρρέει από βαλβίδες ακόμη και μικροσκοπικούς πόρους. Είναι διαβρωτικό προσβάλλοντας μέταλλα, απαιτώντας ειδικά κράματα για την αποθήκευσή του. Επίσης λόγω της πολύ μικρής του πυκνότητας απαιτεί να υγροποιηθεί με παράλληλη ψύξη και συμπίεση, το οποίο απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Για την αποθήκευση του υδρογόνου χρησιμοποιούνται τρεις κυρίως μέθοδοι: η αποθήκευση ως πεπιεσμένο αέριο, αποθήκευση σε υγρή φάση και η αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια. Για την πρώτη περίπτωση της αποθήκευσης ως πεπιεσμένο αέριο αυτό γίνεται σε κυλινδρικές συνήθως φιάλες σε πίεσης της τάξης των 200 bar. Βέβαια με αυτό τον τρόπο αποθήκευσης και επειδή η θερμοκρασία του αερίου υδρογόνου είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αναπόφευκτα δεν μπορεί να αποθηκευτεί μεγάλη ποσότητα αερίου. Στην δεύτερη περίπτωση που απαιτούνται μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, το υδρογόνο αποθηκεύεται σε υγρή μορφή, οι δε συνθήκες που απαιτούνται είναι της τάξης των 22 K για την θερμοκρασία και πίεση χαμηλότερη από 3 bar. Σε αυτή την περίπτωση που μεταφέρουμε μεγάλες ποσότητες υδρογόνου έχουμε τα μειονεκτήματα από την μια ότι λόγω ανταλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον εξατμίζεται ποσότητα υδρογόνου καθιστώντας αναγκαίο να διαφεύγει η εξατμιζόμενη ποσότητα υδρογόνου και από την άλλη για την υγροποίηση και διατήρηση της υγρής φάσης του υδρογόνου απαιτείται ενέργεια που αποτελεί στις συνθήκες εφαρμογές το 25-40% της θερμογόνου ικανότητας του υδρογόνου. Η καλύτερη λύση είναι η αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια δηλαδή η δέσμευση του υδρογόνου από μέταλλα όπως κράματα σιδήρου, τιτανίου, νικελίου χρωμίου.
- Κόστος των εφαρμογών κυψελών καυσίμου. Αν και τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει μεγάλη τεχνολογική πρόοδος στις κυψέλες καυσίμου, παρόλα αυτά το κόστος τους παραμένει υψηλό για αρκετές εφαρμογές.

1.7 Αντιστρεπτή ηλεκτρεγερτική δύναμη και μέγιστος βαθμός απόδοσης κυψέλης καυσίμου

Αποδεικνύεται από την θερμοδυναμική ότι το μέγιστο έργο (σε αντιστρεπτή διεργασία) που μπορεί να παραχθεί από μια ηλεκτροχημική αντίδραση δίνεται από την εξίσωση:

$$\tilde{w}_{rev} = \tilde{g}_R - \tilde{g}_P = -\Delta \tilde{g} \quad (1.4.1)$$

όπου

$$\tilde{g} \quad : \text{ η γραμμομοριακή συνάρτηση Gibbs } \left(\tilde{g} = \tilde{h} - T \cdot \tilde{s} \right) \quad (1.4.2)$$

R : (Reactants) τα αντιδρώντα σώματα

P : (Products) τα προϊόντα της αντίδρασης

Rev : (Reversible) η αντιστρεπτή διεργασία.

Το έργο ηλεκτροχημικής αντίδρασης σε αντιστρεπτή διεργασία υπολογίζεται και από τον τύπο

$$\tilde{w}_{rev} = \tilde{q}_e \cdot E_{rev} \quad (1.4.3)$$

όπου

\tilde{q}_e : το ηλεκτρικό φορτίο/γραμμομόριο καυσίμου

E_{rev} : η ηλεκτρεγερτική δύναμη της αντιστρεπτής διεργασίας.

Ισχύει επίσης :

$$\tilde{q}_e = n_e \cdot N_A \cdot e = n_e \cdot F \quad (1.4.4)$$

όπου

n_e : ο αριθμός των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται στην αντίδραση (για την περίπτωση του H_2 ο αριθμός αυτός είναι 2)

N_A : ο αριθμός Avogadro (μόρια/γραμμομόριο) με ορισμό :

$$N_A = 6,02214 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (1.4.5)$$

Κεφάλαιο 1: Σύνοψη παρουσίαση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου

Το φορτίο e ενός ηλεκτρονίου υπολογίστηκε από τους Mohr και Taylor :

$$e = 1,602176 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad b = 1,602176 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{V}} \quad (1.4.6)$$

Η σταθερά του Faraday F είναι

$$F = N_A \cdot e = 96485,3 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{V}} = 96485,3 \frac{\text{Cb}}{\text{gr} - \text{eq}} \quad (1.4.7)$$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αντιστοιχεί σε αντιστρεπτή διεργασία δίνεται από την σχέση :

$$E_{rev} = \frac{-\Delta \tilde{g}}{n_e \cdot F} \quad (1.4.8)$$

Ορίζοντας τον βαθμό απόδοσης ως το πηλίκο του παραγόμενου έργου προς τη μεταβολή της ενθαλπίας της αντίδρασης ισχύει :

$$-\Delta \tilde{h} = \tilde{h}_R - \tilde{h}_P \quad (1.4.9)$$

$$\eta_{\max} = \frac{W_{rev}}{-\Delta \tilde{h}} = \frac{\Delta \tilde{g}}{-\Delta \tilde{h}} = n_e \cdot F \cdot \frac{E_{rev}}{-\Delta \tilde{h}} \quad (1.4.10)$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας $-\Delta \tilde{h}$ είναι γνωστή στην τεχνική ορολογία με τον όρο «θερμογόνο ικανότητα». Όπου χρησιμοποιείται η σχέση αυτή σε υπολογιστικές διαδικασίες πρέπει να διευκρινίζεται αν αναφέρεται σε ανώτερη ή σε κατώτερη θερμογόνο ικανότητα.

Οι συναρτήσεις $\tilde{h}_R, \tilde{h}_P, \tilde{g}_R, \tilde{g}_P$ είναι συναρτήσεις της μορφής $\tilde{h}(T, P, conc)$, $\tilde{g}(T, P, conc)$ εξαρτώνται από τις συνθήκες που λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δηλαδή την πίεση, την θερμοκρασία και την συγκέντρωση των αντιδρώντων στοιχείων και ειδικά στην περιοχή που λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις κυρίως στην περιοχή γύρω από τα ηλεκτρόδια. Για τον λόγο αυτό και για να είναι δυνατή η αναφορά και η σύγκριση τα διάφορα μεγέθη υπολογίζονται για τις πρότυπες συνθήκες ¹ οι οποίες συμβολίζονται και με τον συντελεστή ⁽⁰⁾. Έτσι για τις πρότυπες συνθήκες έχουμε τις σχέσεις :

$$W_{rev}^0 = g_R^0 - g_P^0 = -\Delta g^0 \quad (1.4.11)$$

$$E_{rev}^0 = \frac{-\Delta g^0}{n_e \cdot F} \quad (1.4.12)$$

$$\eta_{\max}^0 = \frac{W_{rev}^0}{-\Delta \tilde{h}^0} = \frac{\Delta \tilde{g}^0}{-\Delta \tilde{h}^0} = n_e \cdot F \cdot \frac{E_{rev}^0}{-\Delta \tilde{h}^0} \quad (1.4.13)$$

Η συνάρτηση Gibbs όπως αναφέρθηκε επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, τη πίεση και τη συγκέντρωση των αντιδρώντων ουσιών, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται ανάλογα και η ηλεκτρεγερτική δύναμη που εξαρτάται από αυτή. Έτσι από τον ορισμό της συνάρτησης Gibbs (1.4.2) έχουμε :

$$d\tilde{g}_p = d\tilde{h} - T \cdot d\tilde{s} - \tilde{s} \cdot dT \quad (1.4.14)$$

Από τη Θερμοδυναμική γνωρίζουμε την σχέση :

$$d\tilde{h} = T \cdot d\tilde{s} + \tilde{v} \cdot dP \quad (1.4.15)$$

Αν θεωρήσουμε ότι τα αέρια έχουν ιδιότητες ιδανικών αερίων, ισχύει η σχέση :

$$P\tilde{v} = \tilde{R} \cdot T \quad (1.4.16)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (1.4.16) και (1.4.15) στην εξίσωση (1.4.14) και θεωρώντας ότι η μεταβολή είναι ισοθερμοκρασιακή, προκύπτει η σχέση :

$$d\tilde{g}_p = \tilde{R} \cdot T \cdot \frac{dP}{P} \quad (1.4.17)$$

Ολοκληρώνοντας από την πρότυπη μέχρι την πραγματική πίεση και θεωρώντας σταθερή θερμοκρασία έχουμε :

$$\tilde{g} = \tilde{g}(P_0, T) + \tilde{R} \cdot T \cdot \ln \frac{P}{P^0} \quad (1.4.18)$$

Έτσι για οποιαδήποτε εξίσωση της μορφής :



Η μεταβολή της συνάρτησης Gibbs δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta \tilde{g} = \gamma \tilde{g}_\Gamma + \delta \tilde{g}_\Delta - \alpha \tilde{g}_A - \beta \tilde{g}_B \quad (1.4.20)$$

Κεφάλαιο 1: Σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου

Αντικαθιστούμε την Εξ. (1.4.18) στην Εξ. (1.4.20) και έχουμε :

$$\tilde{\Delta}g = \tilde{\Delta}g(P_0, T) + \tilde{R} \cdot T \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{P_\Gamma}{P^0} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{P_\Delta}{P^0} \right)^\delta}{\left(\frac{P_A}{P^0} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{P_B}{P^0} \right)^\beta} \right] \quad (1.4.21)$$

όπου P_i είναι η μερική πίεση του συστατικού i στο μίγμα των αντιδρώντων ή των προϊόντων της αντίδρασης. Αντικαθιστούμε τις Εξ. (1.4.12),(1.4.20) στην Εξ. (1.4.8) και έχουμε την σχέση :

$$E_{rev} = -\frac{1}{n_e \cdot F} \left\{ \tilde{\Delta}g(P^0, T) + \tilde{R} \cdot T \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{P_\Gamma}{P^0} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{P_\Delta}{P^0} \right)^\delta}{\left(\frac{P_A}{P^0} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{P_B}{P^0} \right)^\beta} \right] \right\} \quad (1.4.22)$$

ή

$$E_{rev} = E_{rev}(P^0, T) + \frac{1}{n_e \cdot F} \tilde{R} \cdot T \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{P_\Gamma}{P^0} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{P_\Delta}{P^0} \right)^\delta}{\left(\frac{P_A}{P^0} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{P_B}{P^0} \right)^\beta} \right] \quad (1.4.23)$$

Η εξίσωση (1.4.21),(1.4.22) είναι γνωστή με το όνομα *εξίσωση του Nernst*. Ειδικά για την εξίσωση :



Που είναι η βασική εξίσωση των κυψελών καυσίμου που έχουν ως καύσιμο το υδρογόνο, η εξίσωση (1.4.22) παίρνει την μορφή :

$$E_{rev} = E_{rev}(P^0, T) + \frac{1}{2 \cdot F} \tilde{R} \cdot T \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{P_{H_2}}{P^0} \right) \cdot \left(\frac{P_{O_2}}{P^0} \right)^{0.5}}{\left(\frac{P_{H_2O}}{P^0} \right)} \right] \quad (1.4.25)$$

¹ Ως πρότυπες συνθήκες θεωρούμε: $P^0 = 1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$, $T^0 = 25^0 \text{ C}$

Κεφάλαιο 1: Σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου

Οι προηγούμενες εξισώσεις ισχύουν στην περίπτωση που τα αντιδρώντα είναι σε αέρια φάση και συμπεριφέρονται σαν ιδανικά αέρια.

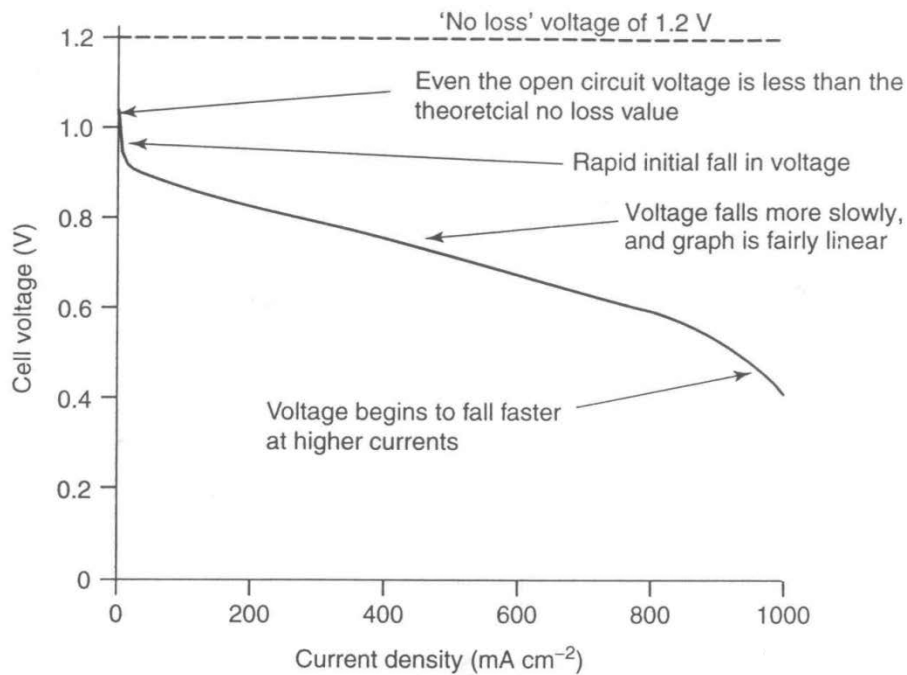
Για λόγους αποφυγής μηχανικών καταπονήσεων (αποφυγή δημιουργίας διαφοράς πίεσης που μπορεί να προκαλέσει ρήξη στη μεμβράνη η οποία έχει πάχος μερικά μm) η πίεση είναι ίδια τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο μιας κυψέλης καυσίμου. Η επίδραση της πίεσης φαίνεται εάν στις προηγούμενες εξισώσεις οι μερικές πιέσεις αντικατασταθούν από τους όρους :

$$P_i = y_i \cdot P \quad (1.4.26)$$

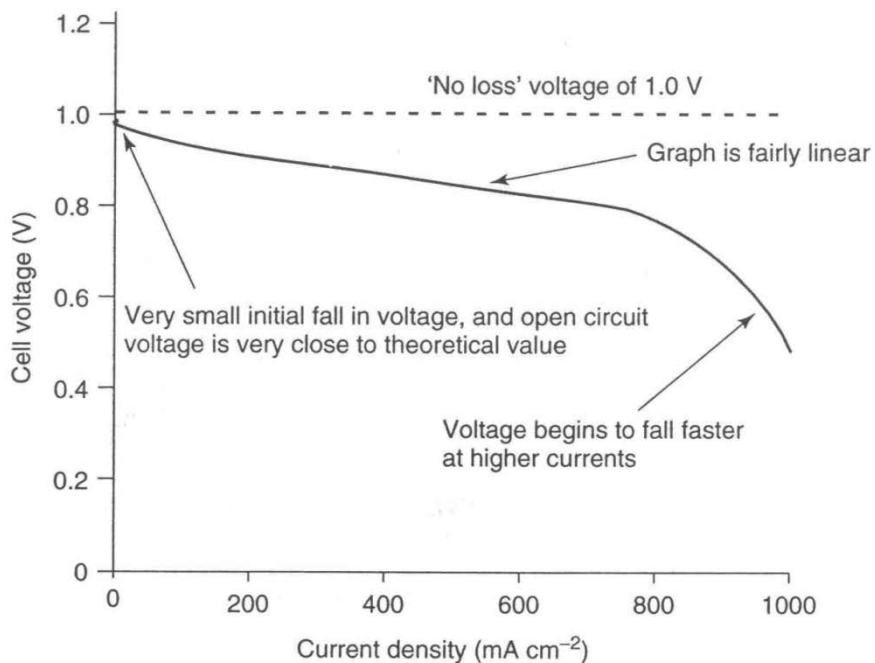
όπου το y_i είναι η γραμμομοριακή περιεκτικότητα του συστατικού i στο μίγμα. Τότε η Εξ. (1.4.25) παίρνει τη μορφή :

$$\begin{aligned} E_{rev} &= E_{rev}(P^0, T) + \frac{\tilde{R} \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{y_{H_2} \cdot y_{O_2}^{0.5}}{y_{H_2O}} \cdot \left(\frac{P_{O_2}}{P^0} \right)^{0.5} \right] = \\ &= E_{rev}(P^0, T) + \frac{\tilde{R} \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{y_{H_2} \cdot y_{O_2}^{0.5}}{y_{H_2O}} \right] + \frac{\tilde{R} \cdot T}{4 \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{P}{P^0} \right] \end{aligned} \quad (1.4.27)$$

1.8 Τάση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου-Υπολογισμός απωλειών τάσης



Σχ. 1.1 Διάγραμμα πόλωσης για κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών [Larminie J. & Dicks A. (2003)].



Σχ. 1.2 Διάγραμμα πόλωσης για κυψέλες υψηλών θερμοκρασιών [Larminie J. & Dicks A. (2003)].

Κεφάλαιο 1: Σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου

Τα Σχ.1.1 και Σχ.1.2 δείχνουν τη μεταβολή της πραγματικής τάσης συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος (polarization curve) για μια κυψέλη καυσίμου. Από την καμπύλη της κυψέλης χαμηλής θερμοκρασίας παρατηρούμε τα εξής :

- Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση ανοιχτού κυκλώματος) είναι πολύ μικρότερη από την αντιστρεπτή ηλεκτρεγερτική δύναμη .
- Μόλις η πυκνότητα ρεύματος αρχίσει να απομακρύνεται από τη μηδενική τιμή της, παρουσιάζεται απότομη πτώση τάσης.
- Στο επόμενο διακριτό κομμάτι η καμπύλη μειώνεται με μικρότερο ρυθμό, σχεδόν γραμμικά.
- Στις μεγάλες πυκνότητες ρεύματος παρουσιάζεται απότομη πτώση τάσης.

Από την καμπύλη κυψέλης υψηλής θερμοκρασίας παρατηρούμε τα εξής:

- Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση ανοιχτού κυκλώματος) είναι λίγο μικρότερη από την αντιστρεπτή ηλεκτρεγερτική δύναμη .
- Η αρχική πτώση τάσης είναι μικρότερη και πιο ομαλή σε σχέση με τις κυψέλες χαμηλής θερμοκρασίας.
- Στο επόμενο διακριτό κομμάτι η καμπύλη μειώνεται με μικρότερο ρυθμό, σχεδόν γραμμικά.
- Στις μεγάλες πυκνότητες ρεύματος παρουσιάζεται και πάλι απότομη πτώση τάσης.

Αν συγκρίνουμε τα Σχ. 1.1 και Σχ. 1.2 μπορούμε να πούμε ότι, αν και η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι χαμηλότερη στις κυψέλες υψηλών θερμοκρασιών σε σχέση με τις κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών, αν λάβουμε υπόψη τις απώλειες που παρουσιάζονται σε κάθε περίπτωση, η πραγματική τάση στις κυψέλες υψηλών θερμοκρασιών είναι μεγαλύτερη από την πραγματική τάση στις κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών, λόγω του ότι το ποσοστό των απωλειών είναι μικρότερο στην πρώτη σε σχέση με τη δεύτερη περίπτωση. Οι απώλειες (αναντιστρεπτότητες) οφείλονται στο ότι οι διεργασίες είναι μη αντιστρεπτές. Στην συνέχεια θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή των απωλειών η κατηγοριοποίησή τους και η παρουσίαση εξισώσεων για τον υπολογισμό τους.

A. Απώλειες ενεργοποίησης (Activation Losses)

Μετά από πειράματα το 1905, ο μηχανικός Tafel παρατήρησε ότι οι πτώσεις τάσης στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου παρουσίαζαν μια παρόμοια μορφή σε μια μεγάλη κατηγορία ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Έτσι σύμφωνα με τον Tafel, ένα μέρος της παραγόμενης τάσης καταναλίσκεται για τη διατήρηση της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που μεταφέρει τα ηλεκτρόνια προς ή από το ηλεκτρόδιο. Μετά από πλήθος πειραμάτων κατέληξε στην πειραματική εξίσωση:

$$\Delta V_{act} = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right), \quad i > i_0 \quad (1.4.28)$$

Όπου,

A : σταθερά η οποία έχει μεγαλύτερη τιμή όταν η αντίδραση είναι αργή

i_0 : σταθερά που μπορεί να θεωρηθεί ως η πυκνότητα ρεύματος, στην οποία η πτώση τάσης αρχίζει να γίνεται μη μηδενική. Έχει υψηλότερη τιμή όταν η αντίδραση είναι γρήγορη.

Στις κυψέλες καυσίμου, οι οποίες διαθέτουν δυο ηλεκτρόδια, η πτώση τάσης εξαιτίας ενεργοποίησης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{act} = A_a \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0a}\right) + A_c \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0c}\right) = A \cdot \ln\left(\frac{i}{b}\right), \quad i > i_0 \quad (1.4.29)$$

Όπου,

$$A = A_a + A_c \quad \text{και} \quad b = i_{0a}^{\frac{A_a}{A}} + i_{0c}^{\frac{A_c}{A}} \quad (1.4.30)$$

Στις σχέσεις αυτές το «a» δηλώνει την άνοδο (anode) και το «c» την κάθοδο (cathode). Στις κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με υδρογόνο είναι $i_{0a} \ll i_{0c}$, δηλαδή η πτώση τάσης λόγω ενεργοποίησης στην άνοδο είναι αμελητέα σε σχέση με αυτήν της καθόδου.

Τυπικές τιμές για κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση είναι :

$$i_{0c} = 0,1 \text{ mA/cm}^2, \quad i_{0a} = 200 \text{ mA/cm}^2$$

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από τα ανωτέρω, η επίδραση του i_0 είναι καθοριστική για την μείωση των υπερτάσεων ενεργοποίησης και συνεπώς των απωλειών ενεργοποίησης. Έτσι καθοριστικός τρόπος για την μείωση των απωλειών είναι η αύξηση της σταθεράς i_0 και ειδικά αυτής της καθόδου που έχει μεγαλύτερη τιμή. Παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν σε αυτό είναι :

- Η αύξηση της θερμοκρασίας της κυψέλης. Αυτό εξηγεί πλήρως τα διαφορετικά διαγράμματα τάσης-πυκνότητας ρεύματος ($V - i_0$) στα οποία είναι εμφανής η διαφορετική συμπεριφορά των κυψελών σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία αντίστοιχα. Χαρακτηριστικό είναι ότι το i_0 παίρνει τιμές :

Χαμηλές θερμοκρασίες : $i_0 = 0,1 \text{ mA} / \text{cm}^2$

Υψηλές θερμοκρασίες (800°C) : $i_0 = 10 \text{ mA} / \text{cm}^2$

- Η χρησιμοποίηση πιο αποτελεσματικών καταλυτών. Είναι γνωστή η επίδραση διαφορετικών μετάλλων-καταλυτών σε μια αντίδραση.
- Η αύξηση της τραχύτητας των ηλεκτροδίων. Αυτό συνεπάγεται με αύξηση της ενεργού επιφάνειας του ηλεκτροδίου.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων. Για παράδειγμα με τη χρησιμοποίηση O_2 αντί για ατμοσφαιρικό αέρα. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται και η αντιστρεπτή τάση ανοιχτοκύκλωσης.
- Η αύξηση της πίεσης. Αυτή όπως και η προηγούμενη μέθοδος, αυξάνει το τελικό ποσοστό των αντιδρώντων στην περιοχή των ηλεκτροδίων και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται και η αντιστρεπτή τάση ανοιχτοκύκλωσης.

B. Απώλειες λόγω διαρροής καυσίμου και εσωτερικών ρευμάτων (*Fuel crossover and internal currents*)

Αν και ο ηλεκτρολύτης επιλέγεται για τις ιδιότητες αγωγιμότητας ιόντων, παρόλα αυτά μπορεί να άγει μικρό αριθμό ηλεκτρονίων, φαινόμενο το οποίο προκαλεί τα λεγόμενα εσωτερικά ρεύματα (*internal currents*). Από την άλλη μεριά κάποια ποσότητα καυσίμου μπορεί να περάσει από την άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο χωρίς να παραχθεί ποσότητα ρεύματος, φαινόμενο το οποίο είναι γνωστό σαν διαρροή καυσίμου (*fuel crossover*). Τα δυο αυτά φαινόμενα είναι στην ουσία ισοδύναμα. Τα φαινόμενα αυτά είναι πιο εμφανή στις κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών, κυρίως επιδρώντας στην τάση ανοιχτοκύκλωσης. Στις κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών όπως είναι οι PEM, αν λειτουργούν με αέρα σε πίεση περιβάλλοντος, τότε η τάση, λόγω του φαινομένου αυτού και ειδικά σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος, θα είναι χαμηλότερη σε σχέση με το θεωρητικό ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης της υπολογισμένης αντιστρεπτής τάσης [Larminie J. and Dicks A. (2003)].

Λόγω της εσωτερικής ροής ρεύματος, η πυκνότητα ρεύματος της κυψέλης δεν είναι μηδενική, ακόμα και όταν βρισκόμαστε σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης. Μια ακόμη παρατήρηση είναι ότι το ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης έχει μεταβλητή τιμή που εξαρτάται, για παράδειγμα, από μια μεταβολή στην υγρασία του ηλεκτρολύτη. Μια από τις μεθόδους υπολογισμού της είναι μέσω της κατανάλωσης των αντιδρώντων αερίων σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης. Βέβαια επειδή η τιμή αυτή είναι μικρή, χρειάζονται ειδικά όργανα για τη μέτρησή της. Θεωρούμε ότι συμβάλλει στις απώλειες λόγω ενεργοποίησης με ένα συντελεστή i_n . Έτσι η Εξ. (1.4.27) παίρνει μια πιο ολοκληρωμένη μορφή :

$$\Delta V_{act} = A \cdot \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right), \quad i > i_0 \quad (1.4.31)$$

Χαρακτηριστική τιμή για τις κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών είναι $i_n = 3 \text{ mAcm}^{-2}$

[Larminie J. and Dicks A. (2003)]

Σε γενικές γραμμές, αυτή η απώλεια δεν έχει καθόλου επίδραση στις κυψέλες υψηλών θερμοκρασιών, αλλά στις κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης.

Γ. Ωμικές Απώλειες (Ohmic Losses)

Απώλειες λόγω ηλεκτρικής αντίστασης των ηλεκτροδίων και αντίστασης στην ροή των ιόντων στον ηλεκτρολύτη είναι σημαντικό μέρος των απωλειών. Το μέγεθος των απωλειών είναι απλά αναλογικό με το διερχόμενο ρεύμα, έτσι έχουμε την εξίσωση :

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot r \quad (1.4.32)$$

Αυτή η απώλεια υπάρχει σε όλους τους τύπους κυψελών και ειδικά στις κυψέλες στερεού οξειδίου [Larminie J. and Dicks A. (2003)]. Τρόποι για την αντιμετώπιση αυτής της αναντιστρεπτότητας είναι οι εξής :

- Η χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων με τη μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα.
- Καλός σχεδιασμός και χρήση κατάλληλων υλικών για τις δίπολες πλάκες και τις μεταξύ τους συνδέσεις.
- Επιλογή ηλεκτρολύτη όσο πιο λεπτού γίνεται. Αυτό δεν είναι πάντα εύκολο μιας και ο ηλεκτρολύτης είναι το στήριγμα στο οποίο «πατάνε» τα ηλεκτρόδια (στις κυψέλες στερεού ηλεκτρολύτη) αλλά γενικά πρέπει να έχει τέτοια αντοχή που να αποτρέπει την οποιαδήποτε επαφή του ενός ηλεκτροδίου με το άλλο (βραχυκύκλωση).

Δ. Απώλειες συγκέντρωσης (Concentration Losses)

Εάν το οξυγόνο τροφοδοτείται στην κάθοδο με τη μορφή αέρα, τότε κατά τη λειτουργία της κυψέλης θα μειωθεί η συγκέντρωσή του στην περιοχή, καθώς το οξυγόνο καταναλίσκεται. Η μεταβολή της συγκέντρωσης εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος στην περιοχή της κυψέλης, την κυκλοφορία του αέρα γύρω από το ηλεκτρόδιο και την ταχύτητα της ανανέωσης του οξυγόνου. Με όμοιο τρόπο, αν η άνοδος τροφοδοτείται με υδρογόνο, εμφανίζεται μια πτώση της πίεσης του υδρογόνου καθώς αυτό καταναλίσκεται, η οποία εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος της κυψέλης και το δίκτυο των αγωγών που τροφοδοτούν το υδρογόνο. Η μείωση της συγκέντρωσης των αερίων προκαλεί πτώση τάσης. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι αυτή η πτώση τάσης περιγράφεται ικανοποιητικά από την σχέση.

Κεφάλαιο 1: Σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου

$$\Delta V_{con} = m \cdot e^{ni} \quad (1.4.33)$$

όπου m , n είναι σταθερές που παίρνουν τις ενδεικτικές τιμές :

$$m = 3 \cdot 10^{-5} \text{ V} , n = 8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{mA}$$

[Larminie J. and Dicks A. (2003)]

E. Συνδυασμένη επίδραση Απωλειών

Αθροίζοντας τις επιμέρους πτώσεις τάσης και αφαιρώντας τις από την αντιστρεπτή τάση έχουμε την εξίσωση :

$$\begin{aligned} V &= E_{rev} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{con} = \\ &= E_{rev} - A \cdot \ln\left(\frac{i}{b}\right) - i \cdot r - m \cdot e^{ni} \end{aligned} \quad (1.4.34)$$

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης
κυψέλης καυσίμου

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

Στην συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των βασικών θεωρητικών εξισώσεων στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης της κυψέλης καυσίμου. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε στην εφαρμογή Simulink του Matlab από τον τότε φοιτητή Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Λάμπρο Νάκο στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του, το 2002. Θα περιγραφούν και οι ενδεχόμενες αλλαγές που θα γίνουν στο μοντέλο έτσι ώστε να προσαρμοστεί στα δεδομένα του δοκιμαστηρίου κυψελών καυσίμου.

Το μοντέλο είναι διαρθρωμένο σε τρία κύρια μέρη, το πρώτο μέρος στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός των διαφόρων μερικών πιέσεων, το δεύτερο στο οποίο γίνεται ενεργειακός υπολογισμός και στο τρίτο στο οποίο υπολογίζονται οι διάφορες απώλειες στην παραγόμενη τάση. Οι σχέσεις οι οποίες είναι από την βιβλιογραφία και συμπληρώνονται από αποτελέσματα από τα πειραματικά δεδομένα για να προσαρμοστούν στο δοκιμαστήριο RU-2101.

Το κεφάλαιο αυτό έχει βασιστεί εξολοκλήρου στις εργασίες :

Nakos G. Lambros (2002), "Simulation of a PEM Fuel cell System for Onboard Application", Athens

Νάκος Γ. Λάμπρος (2006), «Ανάπτυξη στατικού και δυναμικού μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης για ναυτικές εφαρμογές»

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

Η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου βασίζεται στην διαδικασία υπολογισμού της τιμής του δυναμικού κλειστού κυκλώματος.

2.1 Υπολογισμός μερικής πίεσης υδρατμού στις διόδους ροής

Οι εξισώσεις της ενότητας αυτής προέρχονται από το [Amphlett J. C. (1995/A), “Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell-I-Mechanistic Model Development”]

Ο υπολογισμός των μερικών πιέσεων του υδρατμού στις διόδους ροής υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις που ακολουθούν :

$$P_{H_2O,c} = P_{vs} \text{ και } P_{H_2O,a} = 0.5 \cdot P_{vs} \quad (2.1)$$

όπου

$P_{H_2O,c}$ η μερική πίεση του υδρατμού στην κάθοδο

$P_{H_2O,a}$ η μερική πίεση του υδρατμού στην άνοδο

P_{vs} η πίεση κορεσμού του νερού στην θερμοκρασία του πειράματος.

Το συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο βασίζεται στην παραδοχή ότι τα αντιδρώντα αέρια αποτελούνται από καθαρό υδρογόνο για την άνοδο και μείγμα οξυγόνου, αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα στην κάθοδο.

Οι μερικές πιέσεις του οξυγόνου και του υδρογόνου στις εισόδους των διόδων ροής σε συνθήκες εφύγρανσης υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$P_{H_2,inlet}^{hum} = \frac{(P - P_{H_2O,a})}{P} \cdot P_{H_2,inlet}^{dry} \quad (2.2)$$

$$P_{O_2,inlet}^{hum} = \frac{(P - P_{H_2O,a})}{P} \cdot P_{O_2,inlet}^{dry}$$

όπου

οι εκθέτες (*dry*) και (*hum*) υποδηλώνουν τις συνθήκες των αερίων σε κατάσταση ξηρή και σε κατάσταση εφύγρανσης,

η πίεση P είναι η πίεση λειτουργίας (operation pressure) της συσκευής,

οι δείκτες (*inlet*) και (*outlet*) υποδηλώνουν την είσοδο και την έξοδο της κυψέλης αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

Οι μερικές πιέσεις του οξυγόνου και του υδρογόνου στις εξόδους των διόδων ροής χωρίς εφύγραση υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$P_{H_2, outlet}^{dry} = P \quad (2.3)$$

$$P_{O_2, outlet}^{dry} = \left[\frac{x_{O_2, inlet}^{dry} - \frac{x_{O_2, inlet}^{dry}}{S_{O_2}}}{\left(x_{O_2, inlet}^{dry} - \frac{x_{O_2, inlet}^{dry}}{S_{O_2}} \right) + x_{N_2, inlet}^{dry} + x_{CO_2, inlet}^{dry}} \right] \cdot P \quad (2.4)$$

όπου

x_i η ποσότητα σε mol του στοιχείου i

S η στοιχειομετρική ποσότητα του στοιχείου του δείκτη, συγκεκριμένα ο λόγος του παρεχόμενου αερίου προς την ποσότητα που καταναλώνεται.

Οι μερικές πιέσεις του οξυγόνου και του υδρογόνου στις εξόδους των διόδων ροής με εφύγραση υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$P_{H_2, outlet}^{hum} = \frac{(P - P_{H_2O, a})}{P} \cdot P_{H_2, outlet}^{dry} \quad (2.5)$$

$$P_{O_2, outlet}^{hum} = \frac{(P - P_{H_2O, a})}{P} \cdot P_{O_2, outlet}^{dry}$$

Η θεώρηση των μειγμάτων αερίων για την άνοδο και την κάθοδο έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της συγκέντρωσης των αντδρώντων αερίων οξυγόνου και υδρογόνου κατά μήκος των διόδων ροής (αυλακώσεις πλακών άνθρακα). Η μεταβολή αυτή και η μορφή της εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως για παράδειγμα στοιχεία κινητικής της αντίδρασης, τη γεωμετρική μορφή των διόδων ροής καθώς και την ταχύτητα και το προφίλ της ταχύτητας κατά μήκος των διόδων. Στην κάθοδο, η κατανάλωση του οξυγόνου επηρεάζει σε μικρό βαθμό την ταχύτητα ροής του μίγματος λόγω υψηλού στοιχειομετρικού λόγου. Σε αντίθεση, στην άνοδο η κατανάλωση και απορρόφηση του υδρογόνου επηρεάζει την ταχύτητα ροής του μίγματος των αερίων λόγω του μικρού στοιχειομετρικού λόγου του υδρογόνου.

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

Η μερική πίεση του οξυγόνου στην κοινή επιφάνεια της διόδου ροής και του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον λογαριθμικό μέσο των μερικών πιέσεων εισόδου και εξόδου του οξυγόνου σε συνθήκες εφύγρανσης σύμφωνα με τη σχέση :

$$P_{O_2}^{channel} = \frac{P_{O_2,inlet}^{hum} - P_{O_2,outlet}^{hum}}{\ln\left(\frac{P_{O_2,inlet}^{hum}}{P_{O_2,outlet}^{hum}}\right)} \quad (2.6)$$

Η ενεργός μερική πίεση του υδρογόνου στην κοινή επιφάνεια της διόδου ροής και του ηλεκτροδίου μπορεί να προσεγγιστεί καλύτερα χρησιμοποιώντας τον αριθμητικό μέσο των μερικών πιέσεων εισόδου και εξόδου του υδρογόνου σε συνθήκες εφύγρανσης, σύμφωνα με τη σχέση :

$$P_{H_2}^{channel} = \frac{P_{H_2,inlet}^{hum} + P_{H_2,outlet}^{hum}}{2} \quad (2.7)$$

όπου ο εκθέτης (*channel*) δηλώνει πίεση στη δίοδο ροής για το αέριο που αναγράφεται στον δείκτη.

2.2 Υπολογισμός ενεργών τιμών μερικών πιέσεων αντιδρώντων στην επιφάνεια του καταλύτη

Η ενεργός τιμή της μερικής πίεσης του υδρογόνου στην επιφάνεια του καταλύτη υπολογίζεται από την σχέση :

$$P_{H_2}^* = P_{H_2O,a} \times \left[\frac{1}{x_{H_2O}^{sat} \times \exp\left[\frac{R \times T \times i \times L_a}{2 \times F \times P_a \times D_{H_2O,H_2}}\right]} - 1 \right] \quad (2.8)$$

όπου

D_{ij} ο δυαδικός συντελεστής διάχυσης

T, P η θερμοκρασία και πίεση

i η πυκνότητα ρεύματος

L_a το μήκος μεταξύ της διόδου ροής της ανόδου και του καταλύτη

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

F,R σταθερά του Faraday και η σταθερά των ιδανικών αερίων.

Η ενεργός τιμή του δυαδικού συντελεστή διάχυσης του ζεύγους στοιχείων (i, j) στο πορώδες μέσο διάχυσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση σύμφωνα με τη σχέση :

$$D_{i,j}^{eff} = \frac{a}{p} \times \left(\frac{T}{\sqrt{T_{cr,i} \times T_{cr,j}}} \right)^b \times (P_{cr,i} \times P_{cr,j})^{\frac{1}{3}} \times (T_{cr,i} \times T_{cr,j})^{\frac{5}{12}} \times \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}} \times 1.5 \quad (2.9)$$

Η ενεργός τιμή της μερικής πίεσης στην επιφάνεια του καταλύτη υπολογίζεται από την σχέση [Wang et al. (2005)] :

$$P_{H_2}^* = P_{H_2O,c} \times \left[\frac{1 - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^*}{x_{H_2O}^*} - 1 \right] \quad (2.10)$$

όπου στην σχέση αυτή :

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \times \exp\left(\frac{R \times T \times i \times L_c}{4 \times F \times P_c \times D_{H_2O,O_2}} \right) \quad (2.11)$$

$$x_{N_2}^* = x_{N_2}^{channel} \times \exp\left(\frac{R \times T \times i \times L_c}{4 \times F \times P_c \times D_{N_2,O_2}} \right) \quad (2.12)$$

$$x_{CO_2}^* = x_{CO_2}^{channel} \times \exp\left(\frac{R \times T \times i \times L_c}{4 \times F \times P_c \times D_{CO_2,O_2}} \right) \quad (2.13)$$

Επίσης εφαρμόζονται οι σχέσεις:

$$x_{N_2}^{channel} = \frac{P_{N_2}^{channel}}{P} \quad (2.14)$$

$$x_{H_2O}^{channel} = \frac{P_{H_2O,c}}{P} \quad (2.16)$$

$$x_{CO_2}^{channel} = \frac{P_{CO_2}^{channel}}{P} \quad (2.15)$$

$$P_{N_2}^{channel} = \frac{P_{N_2,inlet}^{hum} - P_{N_2,outlet}^{hum}}{\ln\left(\frac{P_{N_2,inlet}^{hum}}{P_{N_2,outlet}^{hum}}\right)}$$

(2.16)

$$P_{CO_2}^{channel} = \frac{P_{CO_2,inlet}^{hum} - P_{CO_2,outlet}^{hum}}{\ln\left(\frac{P_{CO_2,inlet}^{hum}}{P_{CO_2,outlet}^{hum}}\right)} \quad (2.17)$$

2.3 Υπολογισμός Θεωρητικού δυναμικού και απωλειών δυναμικού

Θεωρητικό δυναμικό

Το θεωρητικό δυναμικό υπολογίζεται από τη σχέση :

$$E_{T,P} = -\left(\frac{\Delta H}{n \cdot F} - \frac{T \cdot \Delta S}{n \cdot F}\right) + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln\left[\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right] \quad (2.18)$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5 και χρησιμοποίηση των παραμέτρων που υπολογίστηκαν στις αναλυτικές εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης.

Απώλειες ενεργοποίησης

Υπολογίζονται με την αναλυτική σχέση :

$$\Delta V_{act} = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (2.19)$$

Υπολογίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα οι παράμετροι A, i_o (κεφάλαιο 4, επεξεργασία πειραματικών δεδομένων).

Ωμικές απώλειες

Υπολογίζονται με την αναλυτική σχέση :

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot r \quad (2.20)$$

Και υπολογίστηκε από τα πειραματικά δεδομένα η παράμετρος r (κεφάλαιο 4, επεξεργασία πειραματικών δεδομένων).

Απώλειες λόγω συγκέντρωσης

Οι απώλειες συγκέντρωσης υπολογίζονται με βάση την εξίσωση (1.4.33) του 1ου Κεφαλαίου :

$$\Delta V_{conc} \approx \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.21)$$

όπου,

m εμπειρική σταθερά με προτεινόμενη τιμή:

$$m = 3 \times 10^{-5} \text{ V}$$

n εμπειρική σταθερά με προτεινόμενη τιμή:

$$n = 8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ mA}^{-1}$$

Λόγω του ότι δεν υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις σε αυτή την περιοχή ή δεν θεωρούνται αξιόπιστες χρησιμοποιούμε τις τιμές από την βιβλιογραφία [Larminie J. and Dicks A. (2003)].

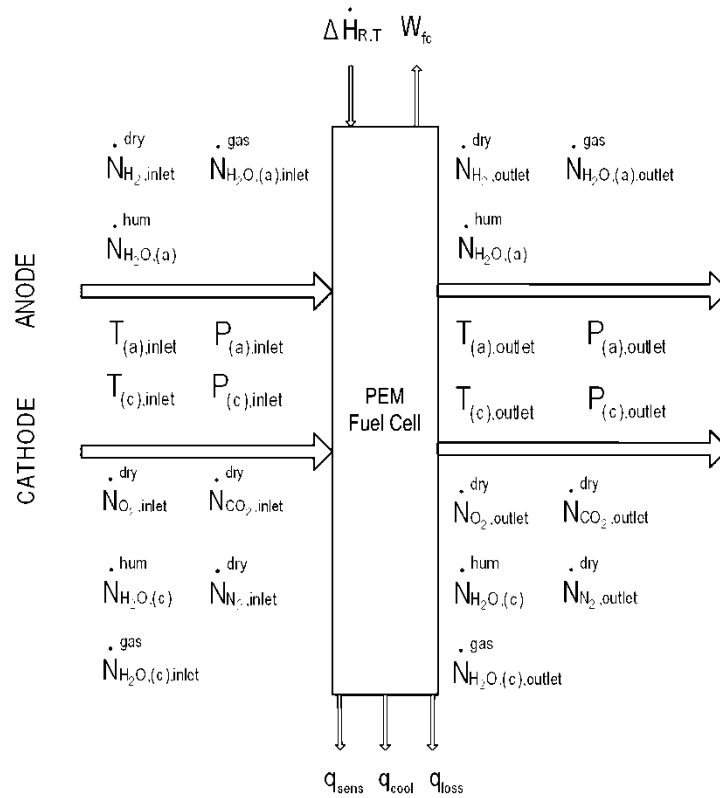
Υπολογισμός δυναμικού κλειστού κυκλώματος

Το δυναμικό κλειστού κυκλώματος υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το θεωρητικό δυναμικό και τις επιμέρους απώλειες δυναμικού, από την σχέση :

$$V = E_{\text{th}} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc} \quad (2.22)$$

2.4 Ισολογισμός μάζας και ενέργειας

Ο ισολογισμός μάζας και ενέργειας στην κυψέλη καυσίμου ακολουθεί σχηματικά το διάγραμμα του Σχ. 2.1 :



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής μάζας και ενέργειας κυψέλης καυσίμου [Νάκος Γ. Λάμπρος (2006)].

Υπολογισμός απαιτούμενης ποσότητας αντιδρώντων αερίων

Ο ρυθμός κατανάλωσης του υδρογόνου, σύμφωνα με τη θεωρία, δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{N}_{H_2}^g = \frac{I}{2 \times F} \tag{2.23}$$

όπου N_i ο ρυθμός κατανάλωσης του αερίου i .

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

Η απαιτούμενη παροχή του υδρογόνου δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{N}_{H_2, inlet}^g = S_{H_2} \times \dot{N}_{H_2}^g \quad (2.24)$$

Ο ρυθμός κατανάλωσης του οξυγόνου, σύμφωνα με τη θεωρία, δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{N}_{O_2}^g = \frac{I}{4 \times F} \quad (2.25)$$

Ενώ η απαιτούμενη παροχή του υδρογόνου δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{N}_{O_2, inlet}^g = S_{O_2} \times \dot{N}_{O_2}^g \quad (2.26)$$

Οι δε παροχές των υπόλοιπων αερίων δίνονται από τις σχέσεις :

$$\dot{N}_{N_2, outlet}^g = \dot{N}_{N_2, inlet}^g = x_{N_2} \times \frac{S_{O_2} \times \dot{N}_{O_2}^g}{x_{O_2}} \quad (2.27)$$

$$\dot{N}_{CO_2, outlet}^g = \dot{N}_{CO_2, inlet}^g = x_{CO_2} \cdot \frac{S_{O_2} \cdot \dot{N}_{O_2}^g}{x_{O_2}} \quad (2.28)$$

Υπολογισμός εξερχόμενης ποσότητας αντιδρώντων αερίων

Οι εξερχόμενες παροχές των αντιδρώντων αερίων δίνονται από τις σχέσεις :

$$\dot{N}_{H_2, outlet}^g = \dot{N}_{H_2, inlet}^g - \dot{N}_{H_2}^g = (S_{H_2} - I) \times \dot{N}_{H_2}^g \quad (2.29)$$

$$\dot{N}_{O_2, outlet}^g = \dot{N}_{O_2, inlet}^g - \dot{N}_{O_2}^g = (S_{O_2} - I) \times \dot{N}_{O_2}^g \quad (2.30)$$

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

Παροχές νερού στην κυψέλη καυσίμου

Οι παροχές του νερού που χρησιμοποιείται για την εφύγρανση των αντιδρώντων στην άνοδο και την κάθοδο είναι :

$$\dot{N}_{H_2O,a}^{g\text{ hum}} = \dot{N}_{H_2,inlet}^{g\text{ dry}} \times \frac{P_{H_2O,a}}{P - P_{H_2O,a}} = S_{H_2} \times \dot{N}_{H_2}^{g} \times \frac{P_{H_2O,a}}{P - P_{H_2O,a}} \quad (2.31)$$

$$\dot{N}_{H_2O,c}^{g\text{ hum}} = \left(\dot{N}_{O_2,inlet}^{g\text{ dry}} + \dot{N}_{N_2,inlet}^{g\text{ dry}} + \dot{N}_{CO_2,inlet}^{g\text{ dry}} \right) \times \frac{P_{H_2O,c}}{P - P_{H_2O,c}} = \frac{S_{O_2} \times \dot{N}_{O_2}^{g}}{x_{O_2}} \times \frac{P_{H_2O,c}}{P - P_{H_2O,c}} \quad (2.32)$$

Ενώ οι παροχές υδρατμού στην έξοδο της κυψέλης είναι :

$$\dot{N}_{H_2O,a,outlet}^{g\text{ gas}} = \dot{N}_{H_2,outlet}^{g\text{ dry}} \times \frac{P_{H_2O,a}}{P - P_{H_2O,a}} = (S_{H_2} - I) \times \dot{N}_{H_2}^{g} \times \frac{P_{H_2O,a}}{P - P_{H_2O,a}} \quad (2.33)$$

$$\dot{N}_{H_2O,c,outlet}^{g\text{ gas}} = \left(\dot{N}_{O_2,outlet}^{g\text{ dry}} + \dot{N}_{N_2,outlet}^{g\text{ dry}} + \dot{N}_{CO_2,outlet}^{g\text{ dry}} \right) \times \frac{P_{H_2O,c}}{P - P_{H_2O,c}} \quad (2.34)$$

Υπολογισμός ενέργειας αντιδράσεως

Η ενέργεια της αντίδρασης βασίζεται στην ενθαλπία της ηλεκτροχημικής αντίδρασης του νερού σύμφωνα με την σχέση :

$$\Delta H_{R,T}^{g} = q_{\text{reaction}} \times \Delta H_{\text{reaction}} = \dot{N}_{H_2}^{g} \quad R,T \quad (2.35)$$

Υπολογισμός παραγόμενης Ισχύος

Η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση :

$$\dot{W}_{el}^g = V \times I \quad (2.36)$$

όπου V,I η τάση και το ρεύμα αντίστοιχα.

Ισολογισμός θερμικής ενέργειας

Η θερμική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που μεταφέρεται μέσω των αντιδρώντων αερίων (υδρογόνο-οξυγόνο) δίνεται από τις σχέσεις:

$$q_{sens,a} = \dot{N}_{H_2,outlet}^g \times c_{p,H_2} \times (T_{a,outlet} - T_0) + \dot{N}_{H_2O,a,outlet}^g \times c_{p,H_2O,a,outlet}^{gas} \times (T_{a,outlet} - T_0) - \dot{N}_{H_2,inlet}^{dry} \cdot c_{p,H_2} \cdot (T_{a,inlet} - T_0) \quad (2.37)$$

$$q_{sens,c} = \dot{N}_{O_2,outlet}^g \times c_{p,O_2} \times (T_{c,outlet} - T_0) + \dot{N}_{N_2,outlet}^g \times c_{p,N_2} \times (T_{c,outlet} - T_0) + \dot{N}_{CO_2,outlet}^{dry} \cdot c_{p,CO_2} \cdot (T_{c,outlet} - T_0) + \dot{N}_{H_2O,c,outlet}^{gas} \cdot c_{p,H_2O,c,outlet}^{gas} \cdot (T_{c,outlet} - T_0) - \dot{N}_{O_2,inlet}^{dry} \cdot c_{p,O_2} \cdot (T_{c,inlet} - T_0) - \dot{N}_{N_2,inlet}^{dry} \cdot c_{p,N_2} \cdot (T_{c,inlet} - T_0) - \dot{N}_{CO_2,inlet}^{dry} \cdot c_{p,CO_2} \cdot (T_{c,inlet} - T_0) \quad (2.38)$$

$$q_{sens,H_2O} = \left(\dot{N}_{H_2O,c}^g + \dot{N}_{H_2O,c}^{hum} \right) \times c_{p,H_2O}^{liquid} \times (T_{H_2O,inlet} - T_0) \quad (2.39)$$

Αθροιστικά έχουμε την σχέση :

$$q_{sens} = q_{sens,a} + q_{sens,c} + q_{sens,H_2O} \quad (2.40)$$

Ισολογισμός ενέργειας

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας απαιτεί το σύνολο της ενέργειας στην είσοδο μιας κυψέλης καυσίμου να είναι ίσο με το σύνολο της ενέργειας στην έξοδο αυτής. Έτσι ισχύει η εξίσωση :

$$\Delta H_{R,T}^g = \dot{W}_{el}^g + \dot{q}_{sens} + \dot{q}_{loss} \quad (2.41)$$

όπου

\dot{W}_{el} η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη

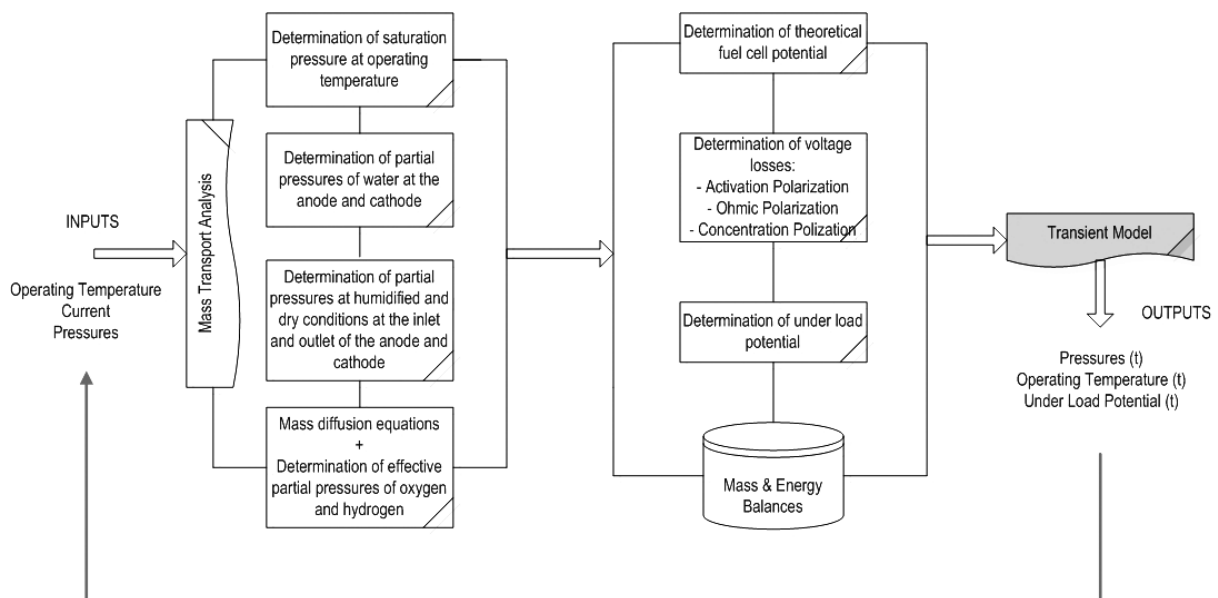
\dot{q}_{sens} η θερμική ενέργεια ανα μονάδα χρόνου που μεταφέρεται μέσω των αντιδρώντων

\dot{q}_{loss} η θερμότητα απωλειών.

Στην εξίσωση (2.41) στην εργασία *Νάκος Γ. Λάμπρος (2006)*, «*Ανάπτυξη στατικού και δυναμικού μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης για ναυτικές εφαρμογές*» αναφέρεται η ποσότητα \dot{q}_{cool} που αναφέρεται στην ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη της συστοιχίας κυψελών. Λόγω απουσίας ψύξης του δοκιμαστηρίου ο όρος αυτός παραβλέπεται.

2.5 Δομή μοντέλου

Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί στην υποεφαρμογή *Simulink* του *Matlab*, η δομή του οποίου ακολουθεί το σχεδιάγραμμα του Σχ. 2.2 :



Σχήμα 2.2 Δομή μοντέλου προσομοίωσης.

Το μοντέλο δέχεται ως εισόδους τη θερμοκρασία λειτουργίας, το ρεύμα και τις πιέσεις, και δίνει ως εξόδους τις μερικές πιέσεις, και το δυναμικό υπό φορτίο. Με μικρή αλλαγή στο μοντέλο μπορούμε να έχουμε ως έξοδο πέραν των αναλυτικών τιμών και τα αντίστοιχα διαγράμματα. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, το μοντέλο ουσιαστικά απαρτίζεται από 3 μεγάλα μέρη, το πρώτο στο οποίο υπολογίζονται οι μερικές πιέσεις σε κάθε σημείο της συσκευής, το δεύτερο στο οποίο υπολογίζονται παράμετροι ροών μάζας και ενέργειας και τέλος στο τρίτο μέρος στο οποίο γίνεται υπολογισμός των απωλειών του δυναμικού και το πραγματικό δυναμικό. Το μοντέλο χρησιμοποιεί αναλυτικές μαθηματικές εξισώσεις, όπου αυτό είναι δυνατό, ενώ χρησιμοποιεί εμπειρικές τιμές και δεδομένα από τη βιβλιογραφία για να κατασκευαστεί με ολότητα το μοντέλο.

Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης είναι οι εξής :

- Αντικαταστάθηκαν οι τιμές που υπολογίστηκαν από τα πειράματα σε σχέση με τις απώλειες δυναμικού A , i_o , r .
- Αφαιρέθηκε από την Εξ. (2.42) η ποσότητα q_{cool} που αφορά στην ενέργεια που καταναλώνεται για την ψύξη της κυψέλης, δεδομένου ότι το δοκιμαστήριο κυψελών καυσίμου δεν διαθέτει ψύξη.

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης κυψέλης καυσίμου

- Αντικαταστάθηκαν οι τιμές $n_{\text{cells}}=3$ και $n_{\text{stacks}}=1$.
- Αφαιρέσαμε την παράμετρο που καθορίζει την συμπίεση του αέρα, δεδομένου ότι το δοκιμαστήριο κυψελών καυσίμου δεν διαθέτει εξωτερικό συμπεστή.
- Αντικαταστήσαμε στην μεταβλητή $A_{\text{eff}}=16.06\text{cm}^2$.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή του δοκιμαστηρίου κυψελών
καυσίμου

3.1 Γενικά στοιχεία δοκιμαστήριου

Στην συνέχεια θα ακολουθήσει περιγραφή του δοκιμαστήριου κυψελών καυσίμου.



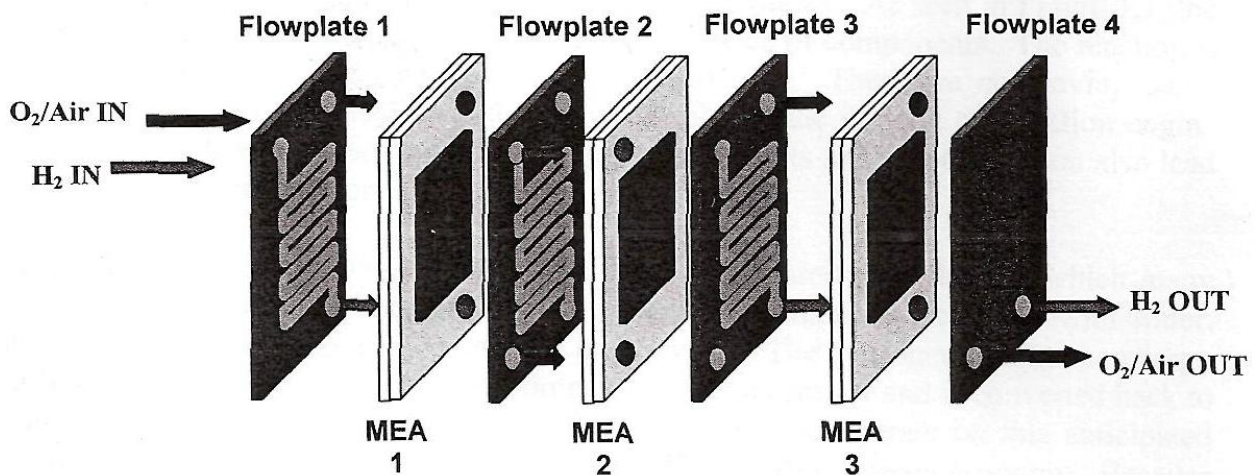
Εικ. 3.1. Δοκιμαστήριο κυψελών καυσίμου RU-2101.

Το δοκιμαστήριο **RU-2101** είναι μια πλήρως λειτουργική πειραματική μονάδα κυψελών πολυμερικής μεμβράνης (PEM). Χρησιμοποιείται σαν συσκευή με διπλή χρησιμότητα από τη μια σαν εκπαιδευτικό εργαλείο για πανεπιστημιακού επιπέδου φοιτητές μηχανικούς και από την άλλη σαν ερευνητικό εργαλείο στο πεδίο των κυψελών πολυμερικής μεμβράνης. Το δοκιμαστήριο αυτό διαθέτει το πλεονέκτημα ότι έχει εγκατεστημένα όλα τα μετρητικά και ρυθμιστικά όργανα που απαιτούνται για την εκτέλεση πειραμάτων, ενώ δίνει τη δυνατότητα αλλαγής της κυψέλης καυσίμου αυξάνοντας τη γκάμα των εκτελούμενων πειραμάτων. Το δοκιμαστήριο δε, έχει δύο λειτουργικές δυνατότητες, τον αυτόματο και τον χειροκίνητο έλεγχο των εκτελούμενων πειραμάτων.

3.2 Χώρος της προς δοκιμή κυψέλης καυσίμου

Στο αριστερό μέρος του δοκιμαστηρίου, βρίσκεται ο χώρος στον οποίο τοποθετείται και συνδέεται η προς δοκιμή συστοιχία κυψελών καυσίμου. Πρόκειται για μια συστοιχία αποτελούμενη από τρεις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Τα αντιδρώντα αέρια στη συστοιχία διοχετεύονται και αυτά σε σειρά, έτσι το μίγμα του αέριου από τη 1^η κυψέλη διοχετεύεται στην συνέχεια στη 2^η κυψέλη και τελικά στη 3^η κυψέλη (Εικ. 3.2). Μια στάνταρ σύνδεση προορίζεται για την είσοδο του αερίου που βρίσκεται μπροστά στη συστοιχία όπως και για την έξοδο του αερίου στο πίσω μέρος της συστοιχίας. Στη συστοιχία είναι συνδεδεμένοι ένας προθερμαντήρας, τέσσερα καλώδια για μέτρηση τάσης και πέντε καλώδια για μέτρηση της θερμοκρασίας.

Πίσω από την κυψέλη καυσίμου είναι τοποθετημένα τα δοχεία εφύγρανσης του υδρογόνου και του αέρα. Από αυτά τα γυάλινα δοχεία που περιέχουν αποσταγμένο νερό διέρχονται τα αντιδρώντα αέρια έτσι ώστε το ρεύμα των αερίων να αποκτήσει υγρασία. Τα δοχεία εφύγρανσης θερμαίνονται με προθερμαντήρες Kартon τοποθετημένους κατάλληλα στην εξωτερική επιφάνεια των δοχείων. Αυτά τα δοχεία πρέπει να είναι τοποθετημένα στις κατάλληλες διαμορφωμένες θήκες και να είναι κλειστά με την ασπίδα Lexar (κατάλληλο πώμα) κατά την διάρκεια της λειτουργίας. Υπάρχουν επίσης δύο μικρότερα γυάλινα δοχεία (πρέπει να είναι μερικώς γεμάτα με αποσταγμένο νερό) για να παρέχουν οπτική ένδειξη της ροής των αερίων της εξόδου (αέρια της εξόδου). Όλος ο υπόλοιπος εξοπλισμός είναι ενσωματωμένος στο μεταλλικό περίβλημα του δοκιμαστηρίου.



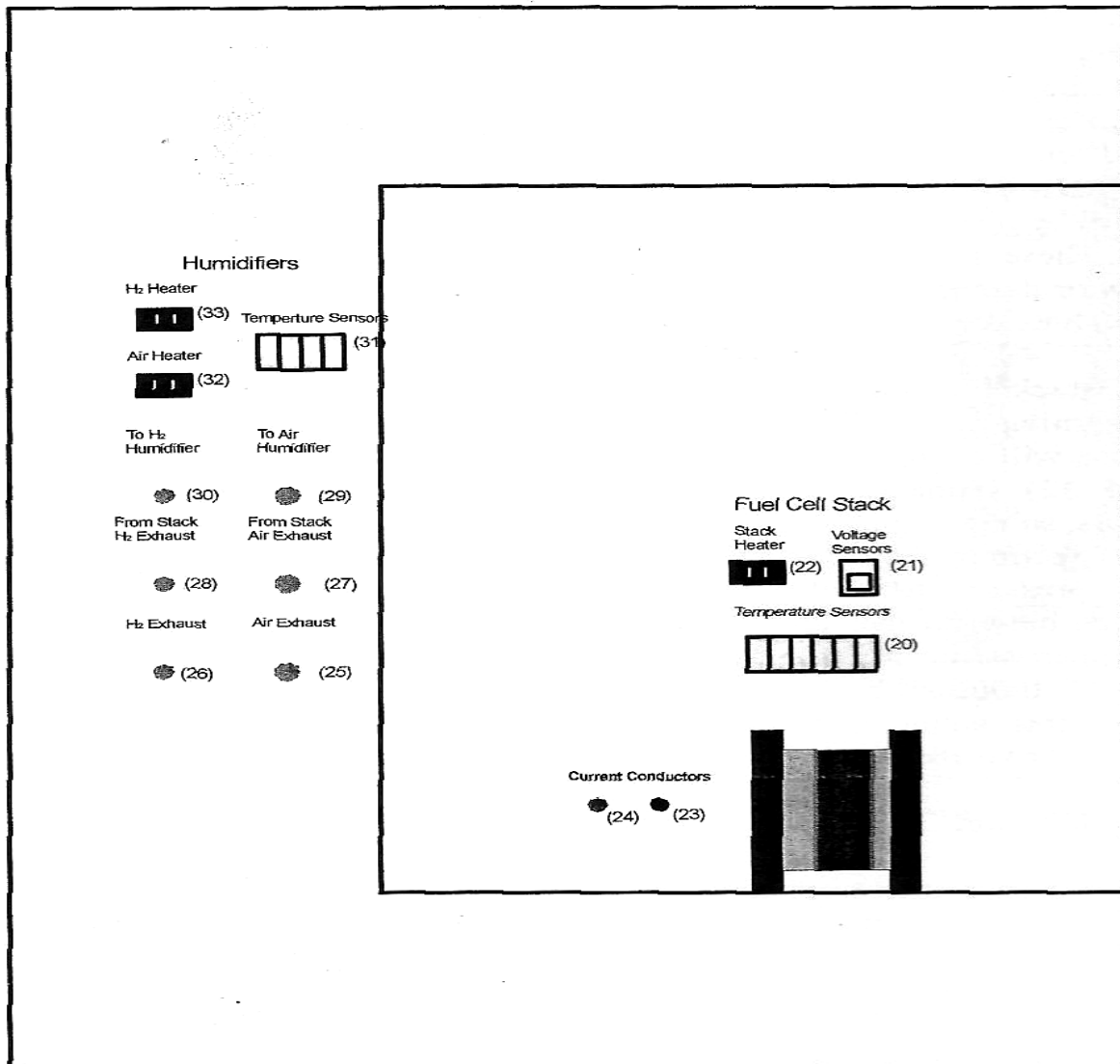
Εικ. 3.2. Η διάταξη των τριών κυψελών στην συστοιχία [εγχειρίδιο RU-2101].

Η συσκευή **RU-2101** απαιτεί πολύ μικρό χρόνο προετοιμασίας για την έναρξη, ενώ μόνο τέσσερις συνδέσεις απαιτούνται: μια 115V/220V εναλλασσόμενου ρεύματος, μια παροχής υδρογόνου, μια παροχής αέρα/οξυγόνου και μια για την έξοδο των αερίων. Η ηλεκτρική σύνδεση με το εναλλασσόμενο ρεύμα και οι συνδέσεις με τα αντιδρώντα αέρια

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή του δοκιμαστηρίου κυψελών καυσίμου

βρίσκονται στην δεξιά πλευρά της πειραματικής συσκευής. Ο αέρας συνδέεται μέσω πλαστικού εύκαμπτου σωλήνα 1/4 in, το υδρογόνο μέσω πλαστικού εύκαμπτου σωλήνα 1/8 in ενώ μια παροχή ρεύματος (πρίζα) διατίθεται για την τροφοδότηση της πειραματικής συσκευής. Στη δεξιά πλευρά βρίσκεται τοποθετημένος ο «εκμηδενιστής» (reset button) για τη διακοπή του κυκλώματος και δύο υποδοχές (θύρες) για τη λήψη των δεδομένων. Υπάρχουν δύο θύρες δεδομένων μια αναλογική και μια σειριακή ψηφιακή. Η αναλογική θύρα είναι μια υποδοχή 25 καρφιών ενώ η ψηφιακή θύρα είναι μια υποδοχή 9 καρφιών. Αυτή η θύρα δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης με υπολογιστή και καταγραφής πειραματικών δεδομένων μέσω του κατάλληλου λογισμικού (control wolf) που παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρεία (TVN).

3.3 Εσωτερικός πίνακας συνδέσεων



Εικ. 3.4. Συνδέσεις μέσα στη πειραματική συσκευή [εγχειρίδιο RU-2101].

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή του δοκιμαστηρίου κυψελών καυσίμου

Το εσωτερικό τμήμα περιλαμβάνει τη συστοιχία κυψελών υδρογόνου, τους εφυγραντήρες, τα δοχεία εξατμίσεων, και όλες τις απαραίτητες συνδέσεις. Οι συνδέσεις περιλαμβάνουν (οι αριθμοί αντιστοιχούν στην Εικόνα 3.4) :

- (20) Θερμοστοιχείο συστοιχίας (συμπεριλαμβανομένου ενός καλωδίου RTD το οποίο ξεχωρίζει από το άσπρο του χρώμα
- (21) Αισθητήρες μέτρησης τάσης
- (22) Αντίσταση θέρμανσης συστοιχίας
- (23) Αγωγός ρεύματος ανόδου
- (24) Αγωγός ρεύματος καθόδου
- (25) Αγωγός εξαγωγής αέρα
- (26) Αγωγός εξαγωγής υδρογόνου
- (27) Αγωγός αέρα από συστοιχία κυψελών υδρογόνου προς την έξοδο αέρα
- (28) Αγωγός υδρογόνου από συστοιχία κυψελών υδρογόνου προς την έξοδο υδρογόνου
- (29) Αγωγός αέρα προς εφυγραντήρα αέρα
- (30) Αγωγός υδρογόνου προς εφυγραντήρα υδρογόνου
- (31) Σύνδεση αισθητήρων θερμοκρασίας
- (32) Ηλεκτρική σύνδεση θερμαντήρα αέρα
- (33) Ηλεκτρική σύνδεση θερμαντήρα υδρογόνου.

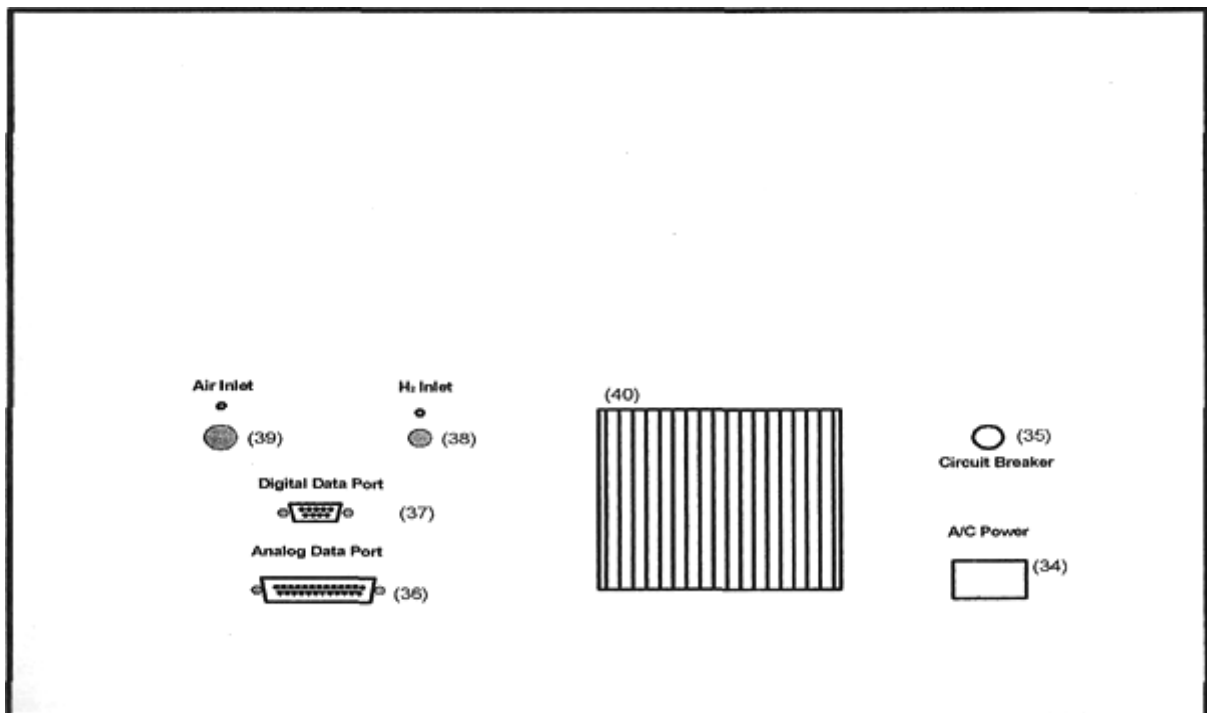
Οι θερμαντήρες για κάθε δοχείο εφυγραντήρα συνδέονται με τον κατάλληλο ακροδέκτη (32),(33) (Εικ. 3.4), ενώ τα θερμοστοιχεία συνδέονται στο αντίστοιχο θερμοστοιχείο εφυγραντήρα (31). Για τη συστοιχία κυψελών, η κάθοδος του αγωγού ρεύματος (24) συνδέεται με τον κατάλληλο ακροδέκτη (lug connector) στη δεξιά πλευρά της συστοιχίας. Επίσης η άνοδος τους αγωγού ρεύματος (23) συνδέεται με το κατάλληλο βύσμα (lug connector) στην δεξιά πλευρά της συστοιχίας. Το μαύρο καλώδιο χρησιμοποιείται για την άνοδο ή για την πλευρά του υδρογόνου ενώ το κόκκινο χρησιμοποιείται για την κάθοδο ή για την πλευρά του οξυγόνου. Οι αισθητήρες μέτρησης τάσεων συνδέονται στον κατάλληλο ακροδέκτη RJ-45 (21). Τα θερμοστοιχεία και ο ακροδέκτης RTD συνδέονται στον κατάλληλο ακροδέκτη στην συστοιχία κυψελών υδρογόνου (20) οι οποίοι είναι και αριθμημένοι για ευκολία στην σύνδεση.

3.4 Εξωτερικός πίνακας συνδέσεων

Η δεξιά πλευρά του δοκιμαστηρίου περιέχει όλες τις απαραίτητες εξωτερικές συνδέσεις. Οι συνδέσεις αυτές περιλαμβάνουν :

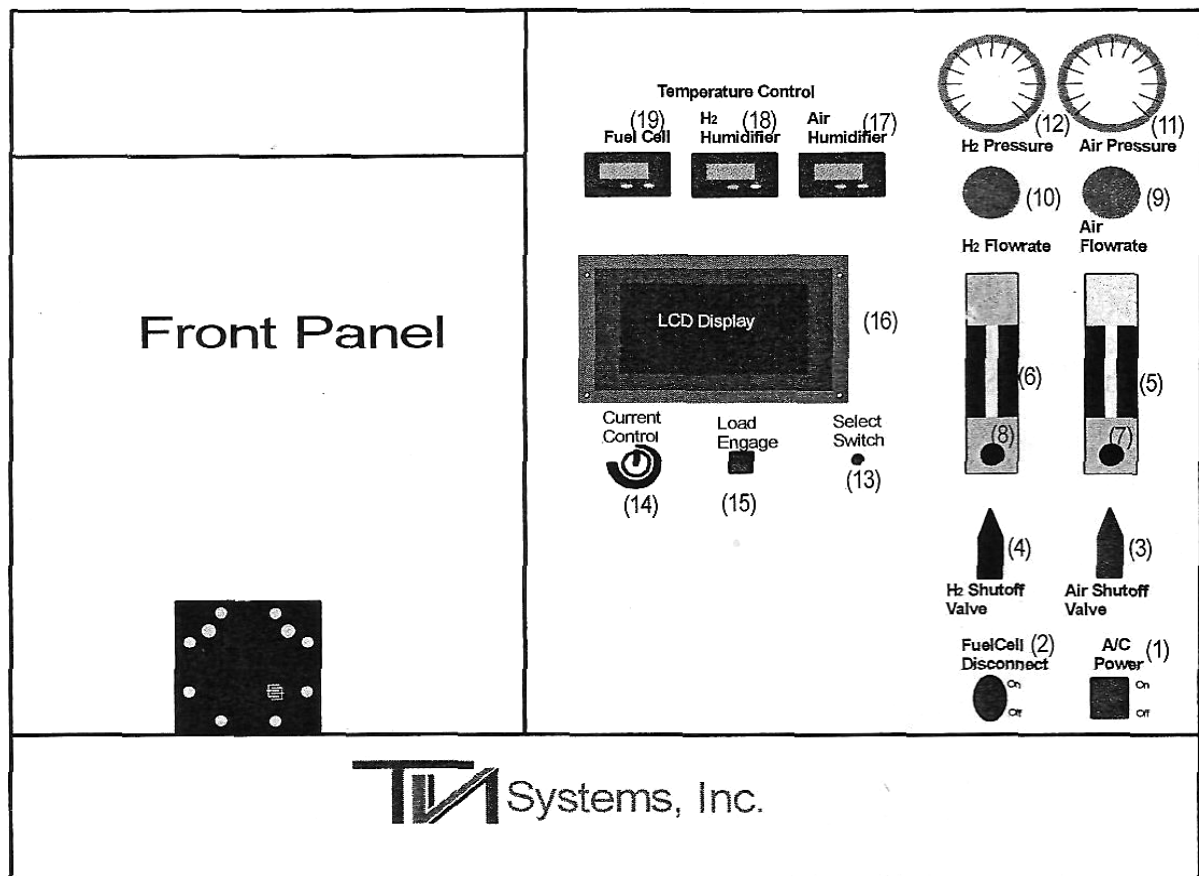
- (34) Σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος
- (35) Διακόπτη έκτακτης ανάγκης
- (36) Αναλογική θύρα δεδομένων
- (37) Ψηφιακή θύρα δεδομένων
- (38) Είσοδο παροχής υδρογόνου
- (39) Είσοδο παροχής αέρα.
- (40) Στόμιο εξαγωγής του ανεμιστήρα, ο οποίος προσφέρει καλύτερο εξαερισμό του εσωτερικού του δοκιμαστηρίου.

Η πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος (34) συνδέεται με το προκαθορισμένο καλώδιο το οποίο παρέχεται από την TVN με το σύστημα. Πάνω από αυτό βρίσκεται το κουμπί διακοπής του κυκλώματος που προστατεύει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Σε αυτή την περίπτωση, ο διακόπτης επαναφοράς κυκλώματος (reset button) θα προεξέχει και θα πρέπει να πατηθεί για να γίνει επαναφορά στο κύκλωμα.



Εικ. 3.5. Συνδέσεις στο εξωτερικό τμήμα της πειραματικής συσκευής [εγχειρίδιο RU-2101].

3.5 Πίνακας ελέγχου



Εικ. 3.3. Σχηματική απεικόνιση του πίνακα ελέγχου [εγχειρίδιο RU-2101].

Στον πίνακα ελέγχου, που βρίσκεται στην πρόσοψη της πειραματικής συσκευής περιλαμβάνονται τα εξής (οι αριθμοί αναφέρονται στην Εικ. 3.3) :

- (1) Κεντρικός διακόπτης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος δοκιμαστηρίου
- (2) Διακόπτης σύνδεσης-αποσύνδεσης της κυψέλης
- (3) Βαλβίδα παροχής του αέρα
- (4) Βαλβίδα παροχής του υδρογόνου
- (5) Μετρητής παροχής όγκου αέρα
- (6) Μετρητής παροχής όγκου υδρογόνου
- (7) Βελονοειδής βαλβίδα ρύθμισης παροχής αέρα
- (8) Βελονοειδής βαλβίδα ρύθμισης παροχής αέρα υδρογόνου

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή του δοκιμαστηρίου κυψελών καυσίμου

- (9) Βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης του αέρα
- (10) Βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης του υδρογόνου
- (11) Μανόμετρο αέρα
- (12) Μανόμετρο υδρογόνου
- (13) Διακόπτης επιλογής μενού της οθόνης υγρών κρυστάλλων
- (14) Περιστροφικός διακόπτης ρύθμισης της έντασης του ρεύματος
- (15) Διακόπτης ενεργοποίησης φορτίου της κυψέλης καυσίμου
- (16) Οθόνη υγρών κρυστάλλων
- (17) Οθόνη ένδειξης θερμοκρασίας εφυγραντή αέρα
- (18) Οθόνη ένδειξης θερμοκρασίας εφυγραντή υδρογόνου
- (19) Οθόνη ένδειξης θερμοκρασίας κυψέλης καυσίμου.

Η συσκευή τίθεται σε λειτουργία όταν τεθεί στη «θέση on» ο κεντρικός διακόπτης (1), ο οποίος και ανάβει. Οι οθόνες ένδειξης θερμοκρασιών (17-19) είναι σχετικά εύκολο να τεθούν σε λειτουργία, αφού ανάβουν όταν ο κεντρικός διακόπτης (1) γυρίζει στην *θέση on*, ενώ η θερμοκρασία απεικονίζεται στην οθόνη σε βαθμούς Κελσίου. Για να αλλάξει δε, το επιλεγμένο θερμοκρασιακό σημείο που τίθεται στις οθόνες, αρκεί να πατήσει κάποιος το πάνω και το κάτω βελάκι, καθώς κρατά πατημένο το «*set button*». Οι θερμοκρασιακοί αυτοί ρυθμιστές ελέγχουν την θέρμανση, όχι την ψύξη, ρυθμίζοντας την θερμοκρασία των κατάλληλων εναλλακτών. Οι ελεγκτές της θερμοκρασίας για τους εφυγραντήρες του αέρα και του υδρογόνου δείχνουν και ελέγχουν την θερμοκρασία στους εφυγραντήρες. Ο ελεγκτής θερμοκρασίας για την συστοιχία κυψελών καυσίμου θα δείχνει στην οθόνη και θα ελέγχει την κοντινότερη πλάκα άνθρακα στον προθερμαντήρα. Όλοι αυτοί οι τρεις θερμοκρασιακοί ελεγκτές μπορεί να ελέγχονται είτε αυτόματα είτε από τον ερευνητή με το χέρι. Όλες οι θερμοκρασίες (οι οποίες δίνονται σε βαθμούς Κελσίου) των υπόλοιπων κυψελών παρουσιάζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων (16).

Το δοκιμαστήριο (**RU-2101**) προσφέρει ολοκληρωμένο έλεγχο του ρεύματος που παράγεται από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου. Υπάρχει ειδικός διακόπτης (15) που συνδέει-αποσυνδέει το φορτίο στη συσκευή (Load engage button), ο οποίος είναι ενεργοποιημένος, όταν βέβαια βρισκόμαστε στην επιλογή του χειροκίνητου χειρισμού (εγχειρίδιο control). Όταν ο διακόπτης δεν είναι ενεργοποιημένος και αναμμένος, η συσκευή βρίσκεται σε λειτουργία ελέγχου από υπολογιστή (computer control). Οι τάσεις της συστοιχίας και κάθε κυψέλης, οι εντάσεις των ρευμάτων και η συνολική ισχύς παρουσιάζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων LCD (16). Ο αριθμός των κυψελών μπορεί να επιλεγεί με την χρήση του διακόπτη επιλογής (13), ενώ για την είσοδο στο μενού επιλογής

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή του δοκιμαστηρίου κυψελών καυσίμου

αρκεί να πατηθεί ο διακόπτης για 3 δευτερόλεπτα. Αυτό μπορεί να συμβεί αν πατηθεί ο διακόπτης (13) μέχρι ο αριθμός της επιθυμητής κυψέλης να εμφανιστεί στην οθόνη υγρών κρυστάλλων, ενώ για την έξοδο από το μενού πρέπει να πατηθεί ο διακόπτης (13) για 3 δευτερόλεπτα.

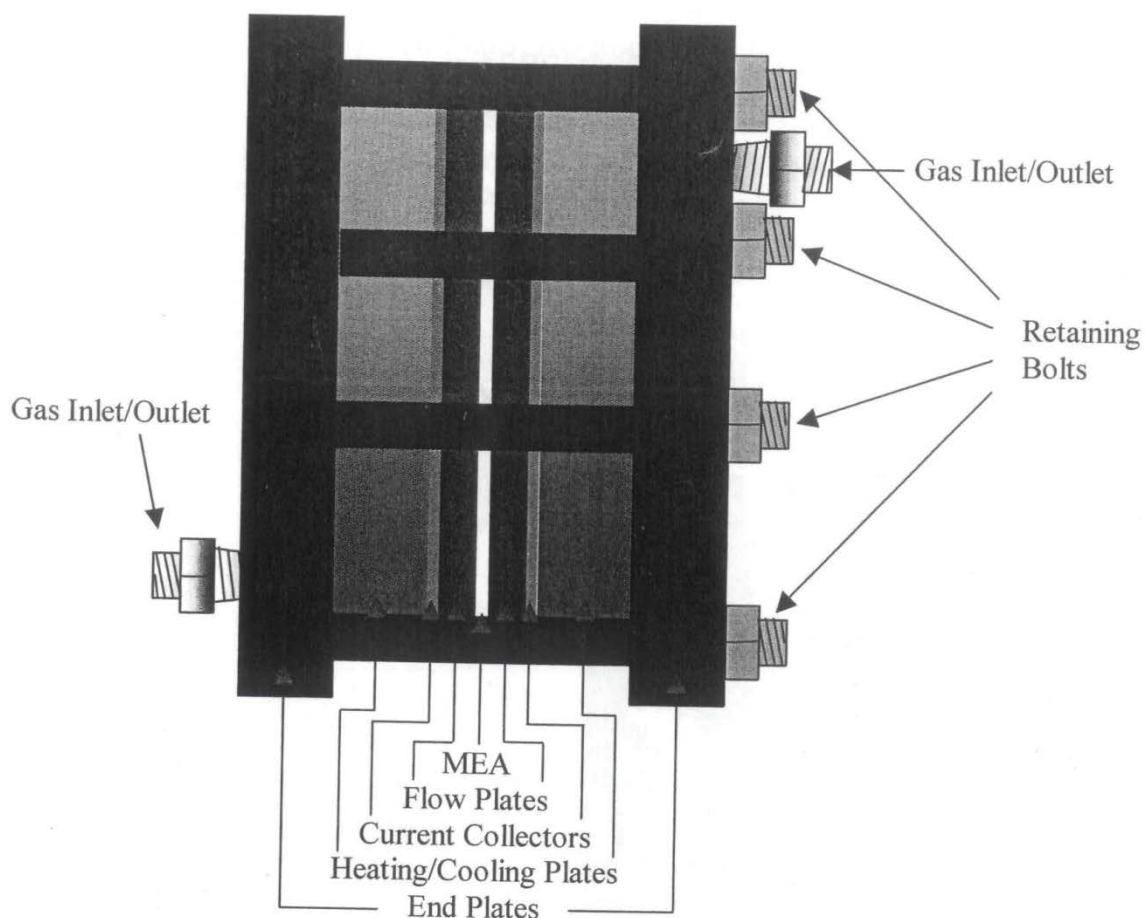
Ο χειροκίνητος έλεγχος του ηλεκτρικού ρεύματος επιτυγχάνεται περιστρέφοντας τον ρυθμιστή (14). Στρέφοντας το κουμπί αντίστροφα από τους δείκτες του ρολογιού θα μειωθεί η ένταση του ρεύματος. Σημειώνεται ότι το ρεύμα είναι το ίδιο για κάθε κυψέλη, γιατί οι κυψέλες είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Επιπρόσθετα με τον διακόπτη επιλογής φορτίου (15), υπάρχει ένας διακόπτης (2) για την αποσύνδεση του φορτίου στη δεξιά πλευρά της συσκευής. Αυτός ο διακόπτης χρησιμοποιείται σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ώστε να αποσυνδεθεί η συστοιχία από το δοκιμαστήριο.

Η ροή των αντιδρώντων αερίων στη συστοιχία κυψελών ελέγχεται από μια σειρά βαλβίδων και δύο ελεγκτές ροής όγκου (mass flow controllers MFC (8),(7)- Εικ.3.3). Στην σύνδεση αυτών των βαλβίδων πρώτες βρίσκονται οι βαλβίδες παροχής (shut off valves (3), (4)). Αυτές οι βαλβίδες είναι οι κεντρικές βαλβίδες παροχής των αερίων στο σύστημα. Για να ρέει το αέριο στο κύκλωμα πρέπει οι λαβές των βαλβίδων να βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση. Η βαλβίδα του υδρογόνου έχει μαύρο χρώμα, ενώ αυτή του αέρα έχει κόκκινο χρώμα. Οι παροχές της κάθε ροής δείχνονται με τα αντίστοιχα ροόμετρα (5), (6). Τα ροόμετρα αυτά ρυθμίζονται σε πρότυπη θερμοκρασία και πίεση, ώστε να είναι δυνατή η άμεση ανάγνωση της ένδειξης της παροχής κάθε χρονική στιγμή (περιγραφή του τρόπου γίνεται στο αντίστοιχο παράρτημα του εγχειριδίου της συσκευής). Στην βάση του κάθε ροόμετρου βρίσκεται κατάλληλη βελονοειδής βαλβίδα (needle valve) που στην χειροκίνητη λειτουργία ελέγχει την παροχή όγκου του αντίστοιχου αερίου (7), (8). Στην χειροκίνητη λειτουργία οι ελεγκτές ροής όγκου ((8),(7)- Εικ.3.3) πρέπει να είναι τελείως ανοικτοί και ο έλεγχος των ροών μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας αυτές τις βελονοειδείς βαλβίδες. Δεν πρέπει δε να θεωρηθούν σαν βαλβίδες κλεισίματος (shut off valves) γι' αυτό και δεν πρέπει να σφίγγονται, γιατί αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη της λειτουργίας τους. Όταν λειτουργούν στη ρύθμιση «ελέγχου με υπολογιστή» αυτές οι βαλβίδες (needle valves) πρέπει να είναι τελείως ανοικτές.

Η πίεση της συστοιχίας κυψελών μπορεί να ρυθμιστεί από δυο ρυθμιστές αντίθλιψης (back pressure regulators) (9), (10). Περιστρέφοντας αυτούς τους διακόπτες αριστερόστροφα η πίεση αυξάνεται, ενώ με δεξιόστροφη περιστροφή η πίεση μειώνεται. Η ένδειξη της πίεσης φαίνεται στα αναλογικά όργανα (11), (12) αμέσως πάνω από τους ρυθμιστές πίεσης. Αυτοί οι ρυθμιστές πίεσης βρίσκονται σε τέτοια θέση που μετράται η πίεση στην έξοδο της συστοιχίας. Αυτό είναι καλύτερο γιατί παρέχεται μεγαλύτερη ασφάλεια ότι η επιθυμητή πίεση είναι η πραγματική. Η εταιρεία TVN systems δεν συνιστά να λειτουργεί η συσκευή με διαφορετική πίεση. Όταν η συσκευή πρέπει να λειτουργεί σε αυξημένη πίεση, η πίεση του υδρογόνου και του οξυγόνου πρέπει να είναι ίδια, ενώ να σημειωθεί ότι η διαφορά στην πίεση υδρογόνου-οξυγόνου θα προκαλέσει μια διαφορετική πίεση κατά μήκος των κυψελών. Εφαρμόζοντας μια πίεση σε μια μεμβράνη που έχει πάχος μόνο 50 μ (2 εκατομμυριοστά της in) μπορεί να προκαλέσει βλάβη στην μεμβράνη, γεγονός το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν λειτουργεί η συσκευή με πίεση πάνω από 10 psig ή 24.7 psia.

3.6 Κυψέλη καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου που χρησιμοποιείται είναι μια κυψέλη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) η οποία είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει την χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο υδρογόνο και το οξυγόνο απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η κάθε κυψέλη αποτελείται από μια πολυμερική μεμβράνη, δυο ηλεκτρόδια, δύο χάλκινους συλλέκτες ρεύματος και δύο πλάκες άνθρακα. Το υδρογόνο και το οξυγόνο αντιδρούν στις δυο αντίθετες πλευρές της μεμβράνης για να παράγουν τελικά νερό, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Για να είναι δυνατό αυτό, οι αντιδράσεις του υδρογόνου και του οξυγόνου είναι διαχωρισμένες από μια πολυμερική μεμβράνη (η οποία αναφέρεται και σαν μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων) που λειτουργεί σαν ηλεκτρολύτης.



Εικ. 3.4. Σχηματική αναπαράσταση κυψέλης υδρογόνου [εγχειρίδιο RU-2101].

Αυτός ο ηλεκτρολύτης έχει μια επίστρωση καταλύτη σε κάθε πλευρά για να επιταχύνει τον ρυθμό των αντιδράσεων και να παρέχει ηλεκτρική αγωγιμότητα για τη ροή των ηλεκτρονίων. Τα αντιδρώντα αέρια διέρχονται από κανάλια χαραγμένα στις πλάκες άνθρακα, τα οποία είναι μεταξύ τους εγκάρσια διατεταγμένα. Ενώ το αέριο διέρχεται από κανάλια παράλληλα στην μεμβράνη, το αέριο μπορεί να διοχετευθεί από το στρώμα του καταλύτη μεμβράνης για να αντιδράσει. Το παραγόμενο νερό διοχετεύεται στα κατάλληλα κανάλια ενώ το ηλεκτρικό

δυναμικό που παράγεται μεταφέρεται από τους χάλκινους συλλέκτες ρεύματος, οι οποίοι συνδέονται με το εξωτερικό ηλεκτρικό φορτίο.

Το δοκιμαστήριο περιέχει τρεις κυψέλες ανταλλαγής πρωτονίων από αυτές που περιγράφηκαν προηγουμένως. Αυτές οι κυψέλες είναι συνδεδεμένες σε σειρά και παράγουν τάση η οποία είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους κυψελών.

3.7 Ηλεκτρονικός Υπολογιστής και UPS

Το δοκιμαστήριο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο του ρεύματος και με πλαστικούς εύκαμπτους σωλήνες με τις φιάλες αποθήκευσης υδρογόνου και αέρα. Στη σύνδεσή του με το δίκτυο του ρεύματος παρεμβάλλεται συσκευή αδιάλειπτης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος (UPS) για την ασφάλεια του δοκιμαστηρίου από υπερτάσεις και αυξομειώσεις στο ρεύμα που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα κυκλώματα.

Κεφάλαιο 4

Πειραματικά αποτελέσματα από τη χρήση του δοκιμαστηρίου

Κεφάλαιο 4 : Πειραματικά αποτελέσματα από την χρήση του δοκιμαστήριου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραμάτων που εκτελέστηκαν στο δοκιμαστήριο κυψελών καυσίμου. Τα πειράματα επεξηγούνται και παρατίθενται διαγράμματα των βασικών μεγεθών. Τα διαγράμματα είναι τριών ειδών: Έντασης ηλεκτρικού ρεύματος¹-Χρόνου (Current-time), Τάσης-Χρόνου (Volts-Time), και Θερμοκρασίας-Χρόνου (Temperature-Time). Στο τέλος της κάθε ομάδας πειραμάτων παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα πυκνότητας ρεύματος-τάσης, πυκνότητας ρεύματος-ισχύος, πυκνότητας ρεύματος-βαθμού απόδοσης και γίνεται σύγκριση και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση κάθε παραμέτρου στα μελετώμενα μεγέθη. Για τα εκτελούμενα πειράματα έχει χρησιμοποιηθεί το εγχειρίδιο οδηγιών και συγκεκριμένα το Κεφάλαιο 3.

Σε κάθε πείραμα αρχικά γίνεται προθέρμανση και μετά ακολουθούν οι μετρήσεις, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή ή τις προκαθορισμένες μετρήσεις του ερευνητή. Για τα επόμενα πειράματα έχει χρησιμοποιηθεί η λειτουργία μέσω υπολογιστή (computer mode) και η κλιμακωτή μεταβολή ρεύματος (currents staircase).

Στην κλίμακα ρεύματος μεταβάλλεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος κατά συγκεκριμένο βήμα (increment) για συγκεκριμένο χρόνο (stair time), τα οποία προσδιορίζονται στον κατάλληλο πίνακα της εφαρμογής πριν την έναρξη του κάθε πειράματος. Κατά τη διάρκεια της μεταβολής του ρεύματος, μεταβάλλονται τα σχετιζόμενα μεγέθη όπως η τάση και η τελική ισχύς.

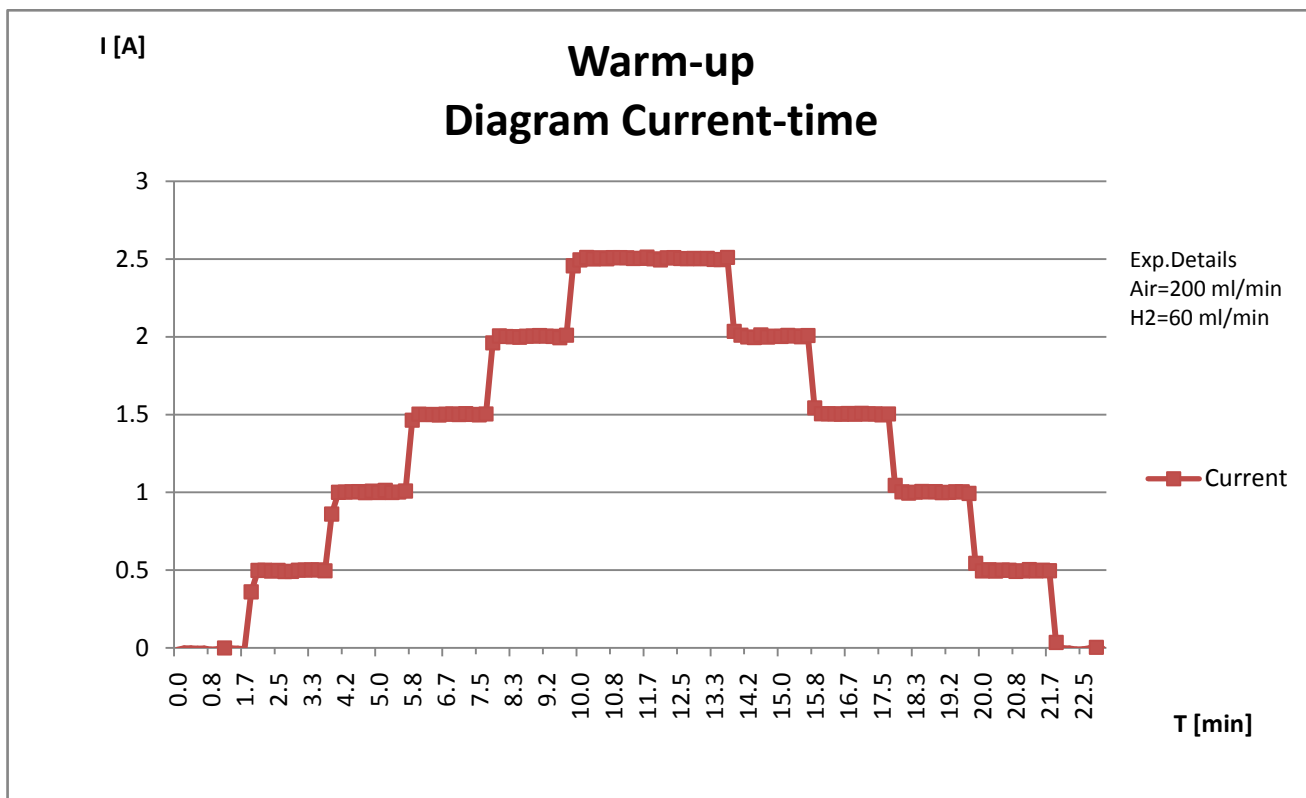
¹ Για συντομία, η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος θα αναφέρεται με τη λέξη ρεύμα στη συνέχεια, όπου δεν υπάρχει κίνδυνος σύγχυσης.

4.1 Προθέρμανση

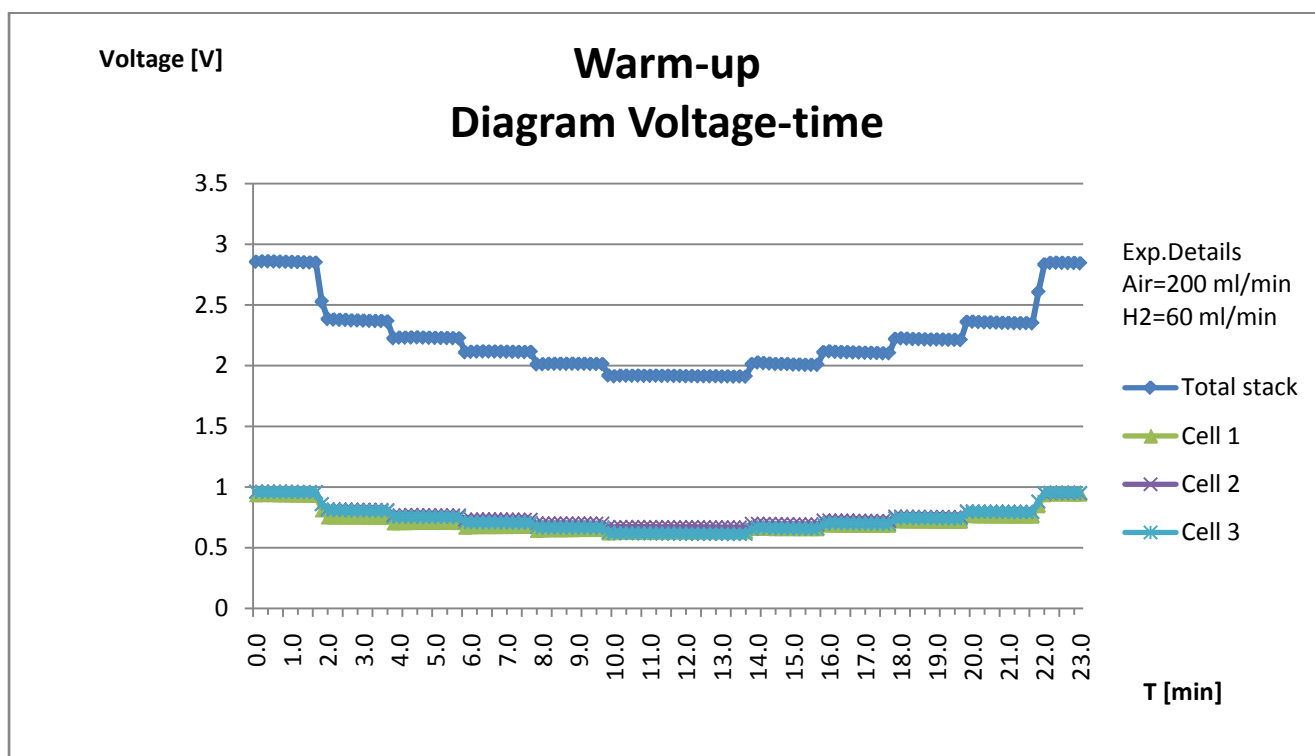
Η προθέρμανση της συσκευής πρέπει να γίνεται πάντοτε πριν από κάθε πείραμα και αυτό για να διασφαλίσουμε την καλή απόδοση της κυψέλης. Η θερμοκρασία παίζει ρόλο στις δημιουργούμενες αντιδράσεις (ηλεκτροχημικές αντιδράσεις), οπότε με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ένα επιθυμητό επίπεδο θερμοκρασιών. Εκτελούμε μια κλιμακωτή μεταβολή ρεύματος (current staircase) με παροχές αέρα 200 ml/min και υδρογόνου 60 ml/min, από 0-2,5 A με βήμα 0,5 A και διάρκεια κάθε σκαλιού 2 λεπτά. Οι μεταβολές των διαφόρων μεγεθών απεικονίζονται στα Σχ. 4.1-4.3. Οι θερμοκρασίες που συμπληρώνονται σε κάθε πίνακα πειράματος είναι αυτές που θα συμπληρωθούν και στο εκάστοτε πείραμα έτσι ώστε μέσω της προθέρμανσης να καταλήξουμε στις απαιτούμενες θερμοκρασιακές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με το πείραμα, που αναμένεται να διενεργηθεί απαιτούνται και άλλες θερμοκρασίες (για την συστοιχία κυψελών, τους υγραντήρες αέρα και υδρογόνου) που σημαίνει άλλα τελικά διαγράμματα προθέρμανσης. Εδώ παρατίθενται μόνο τα διαγράμματα της προθέρμανσης της πρώτης κατηγορίας πειραμάτων, διότι τα άλλα διαγράμματα μοιάζουν.

Πίνακας 4.1. Περιγραφή συνθηκών προθέρμανσης.

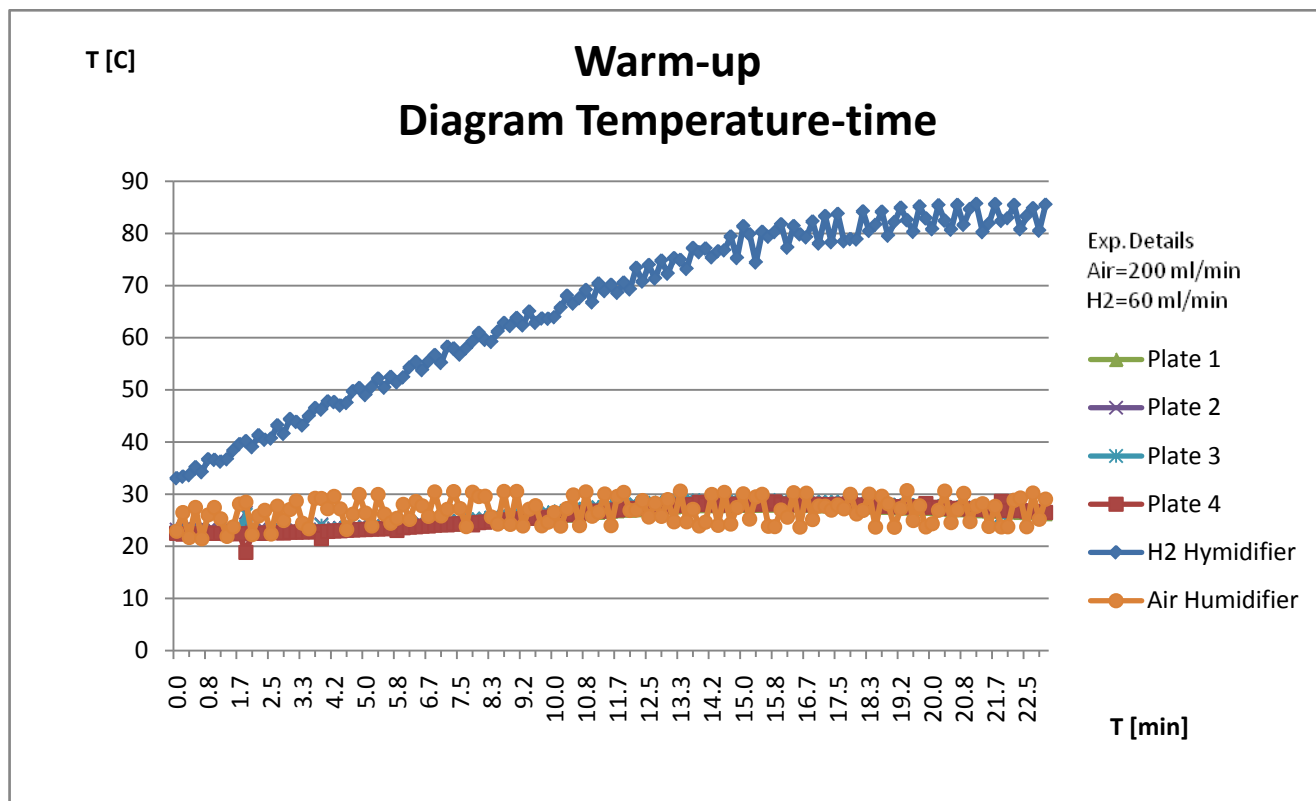
Διαδικασία προθέρμανσης											
Παροχή H ₂	Παροχή αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
		Αρχική τιμή ρεύματος	Τελική τιμή ρεύματος	Βήμα			Συστοιχίας Κυψελών	Υγραντήρας H ₂	Υγραντήρας αέρα	H ₂	αέρας
ml/min	ml/min	A	A	A	-	sec	°C	°C	°C	psig	psig
200	60	0	2.5	0.5	1	120	60	80	25	0	0



Σχ. 4.1. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου κατά την προθέρμανση.



Σχ. 4.2. Διάγραμμα τάσης-χρόνου κατά την προθέρμανση.



Σχ. 4.3. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου κατά την προθέρμανση.

Παρατηρήσεις – Σχόλια στα διαγράμματα προθέρμανσης

Η προθέρμανση είναι αναγκαία σε μια κυψέλη καυσίμου για να επιτευχθούν οι αναγκαίες συνθήκες για την αποτελεσματική λειτουργία της συστοιχίας. Ανάλογα με το πείραμα που ακολουθεί ή ανάλογα με την συνθήκες λειτουργίας σε μια πραγματική εφαρμογή απαιτείται και άλλη προθέρμανση όσον αφορά το επίπεδο των θερμοκρασιών. Άρα όπως αναφέρθηκε (1^η παράγραφο ενότητα 4.1) ανάλογα με το πείραμα απαιτείται και άλλο επίπεδο θερμοκρασιών και άρα και άλλη προθέρμανση.

Όσον αφορά τα διαγράμματα, παρατηρούμε στο διάγραμμα τάσης – χρόνου (Σχ. 4.2) ότι η κυψέλη 2 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη τάση από τις υπόλοιπες ενώ ακολουθεί, η κυψέλη 1 και τέλος η κυψέλη 3. Θεωρητικά θα έπρεπε να έχουν την ίδια τάση, αλλά μικροδιαφορές αναμφίβολα υπάρχουν σε επίπεδο δομής των κυψελών, οπότε εξηγείται η ελαφρώς διαφορετική τάση που παράγουν. Συν τοις άλλοις η τάση μεταβάλλεται αντιστρόφως με το ρεύμα όπως γνωρίζουμε και από τη θεωρία, είναι προφανές δε από τα διαγράμματα ότι όταν αυξάνεται το ρεύμα η τάση μειώνεται κατά γνωστό ποσό. Όσον αφορά το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου, (Σχ. 4.3) παρατηρούμε ότι οι αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας στους εφυγραντήρες υδρογόνου και του αέρα έχουν σχετικά μεγάλες αποκλίσεις στις μετρούμενες τιμές. Ίσως αυτό οφείλεται στην χαμηλή ευαισθησία των οργάνων και στη ρύθμισή τους. Το ποσοστό της απόκλισης κυμαίνεται από 15-25% ανάλογα με την περιοχή των θερμοκρασιών.

4.2 Πείραμα παροχής αντιδρώντων αερίων – Πείραμα αέρα

Στο πείραμα αυτό μετρώνται τα μεγέθη του ρεύματος, της τάσης και της θερμοκρασίας για διάφορες παροχές του αέρα και του υδρογόνου. Το πείραμα αυτό έχει δύο μέρη: το πρώτο, στο οποίο μεταβάλλεται η παροχή του αέρα και κρατούνται σταθερές οι υπόλοιπες μεταβλητές, και το δεύτερο στο οποίο μεταβάλλεται η παροχή του υδρογόνου και κρατούνται σταθερές οι υπόλοιπες μεταβλητές. Σε κάθε περίπτωση χαράσσονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πείραμα παροχής αέρα - α' υποκατηγορία

Το πείραμα αυτό έχει δύο υποκατηγορίες, στην πρώτη παραμένει σταθερή η παροχή του υδρογόνου στα 200 ml/min ενώ του αέρα παίρνοντας τρεις τιμές 400 ml/min, 600 ml/min και 800 ml/min αντίστοιχα. Οι θερμοκρασίες είναι της συστοιχίας κυψελών 60°C, του υγραντήρα υδρογόνου 80 °C και του εφυγραντήρα αέρα 25°C (περίπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος). Εκτελούνται δύο κλίμακες ρεύματος στο πρώτο πείραμα με μέγιστο ρεύμα 6 A, βήμα 0,5 A και διάρκεια 1 min/σκαλί ενώ στο δεύτερο και τρίτο πείραμα εκτελούνται δυο κλίμακες με μέγιστο ρεύμα 7 A και βήμα 0,5 A και διάρκεια 1 min/σκαλί.

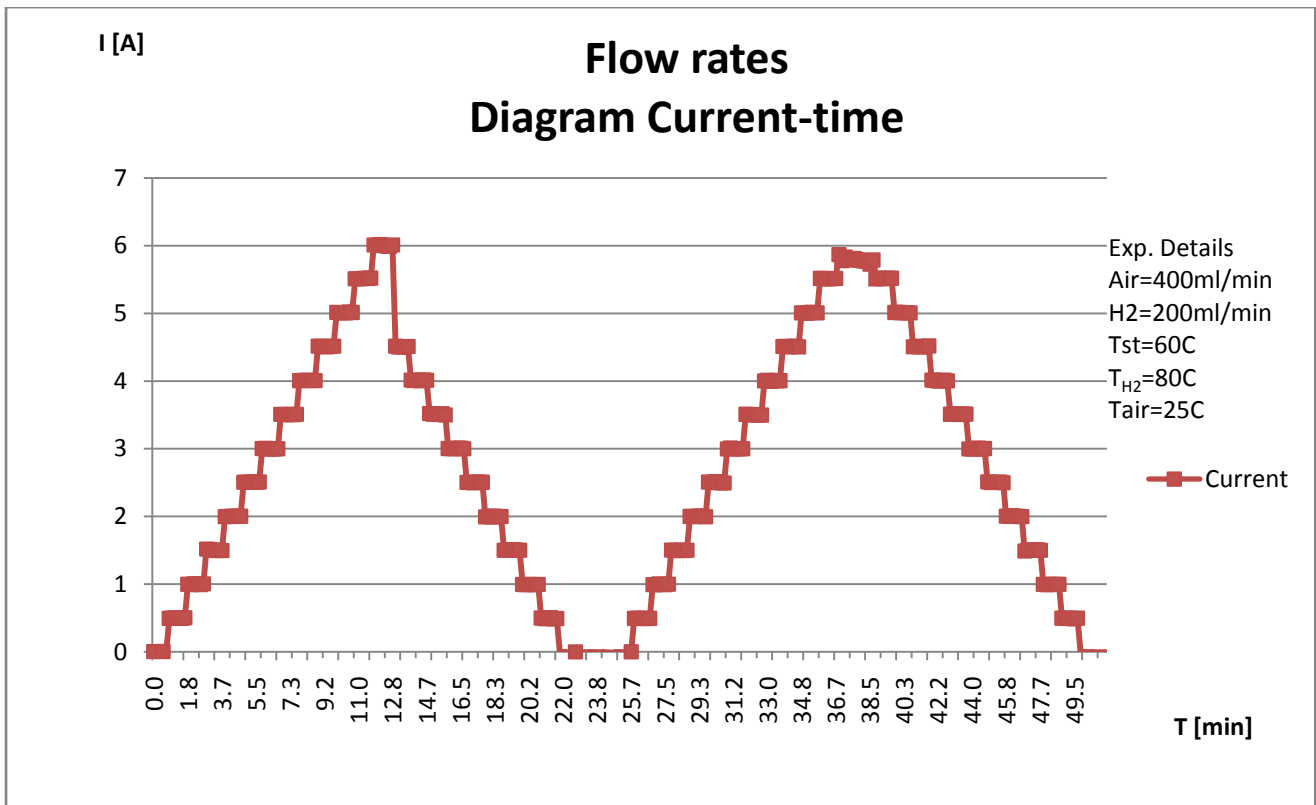
Πείραμα παροχής αέρα - β' υποκατηγορία

Στην δεύτερη υποκατηγορία κρατούμε σταθερό το ρεύμα στα 3 A και εφαρμόζουμε παροχές αέρα 200 ml/min, 300 ml/min, 400 ml/min με σταθερή παροχή υδρογόνου 200 ml/min και χρονική διάρκεια πειράματος 10 min. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε διαγράμματα.

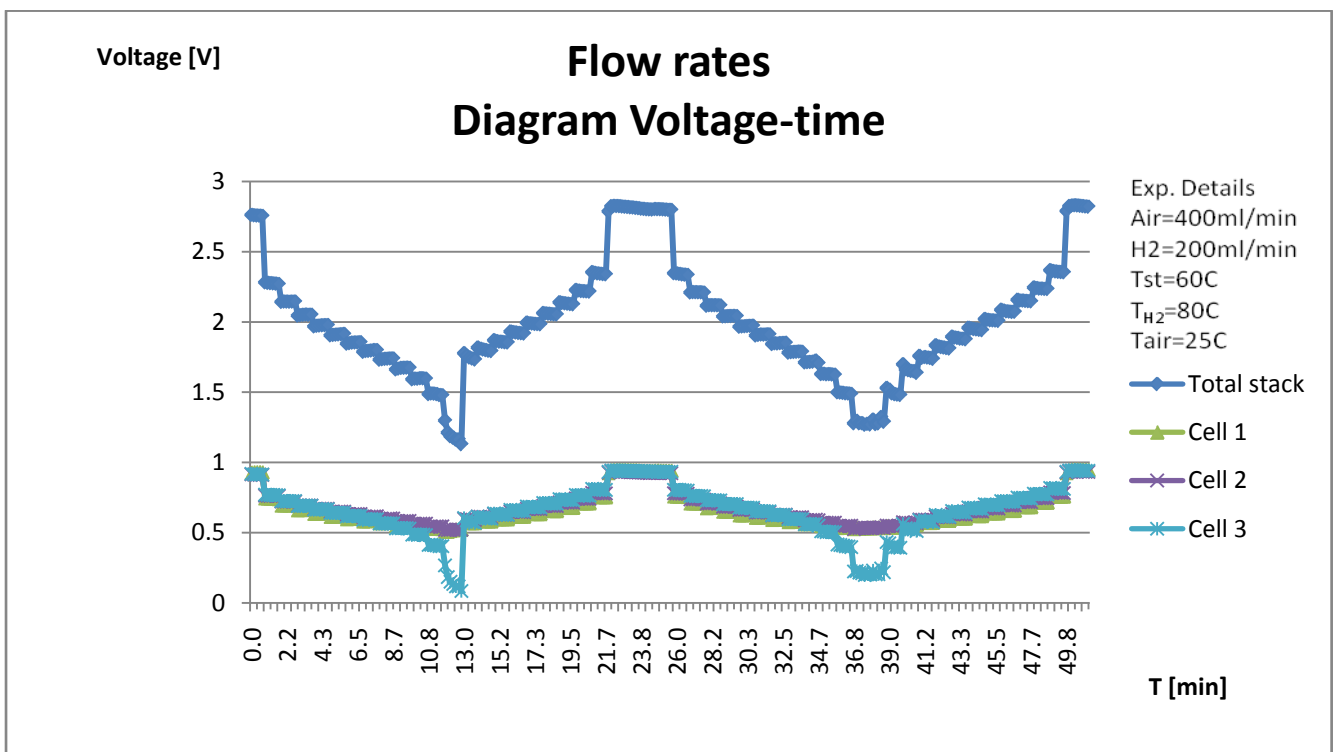
Συγκεκριμένα έχουμε :

Πίνακας 4.2. Περιγραφή συνθηκών πειράματος παροχής αέρα.

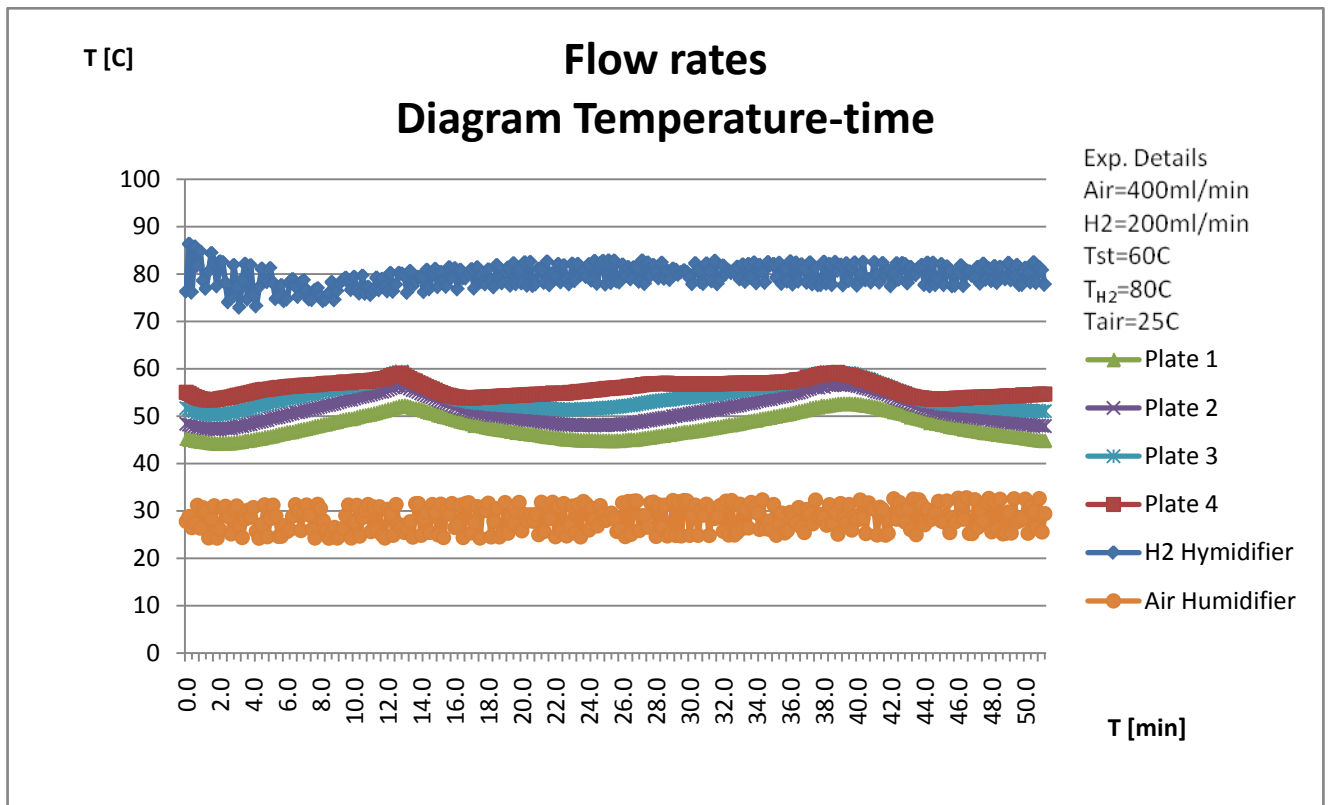
Πείραμα Παροχής Αέρα												
	Παροχή H ₂	Παροχή Αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
			Αρχική τιμή ρεύματος	Τελική τιμή ρεύματος	Βήμα			Συστοιχίας Κυψελών	Υγραντήρα H ₂	Υγραντήρα Αέρα	H ₂	Αέρα
	ml/min	ml/min	A	A	A	-	min	°C	°C	°C	psig	psig
1	200	400	0	6	0.5	2	1	60	80	25	0	0
2	200	600	0	7	0.5	2	1	60	80	25	0	0
3	200	800	0	7	0.5	2	1	60	80	25	0	0
4	200	200	3	3	-	2	10	60	80	25	0	0
5	200	300	3	3	-	2	10	60	80	25	0	0
6	200	400	3	3	-	2	10	60	80	25	0	0



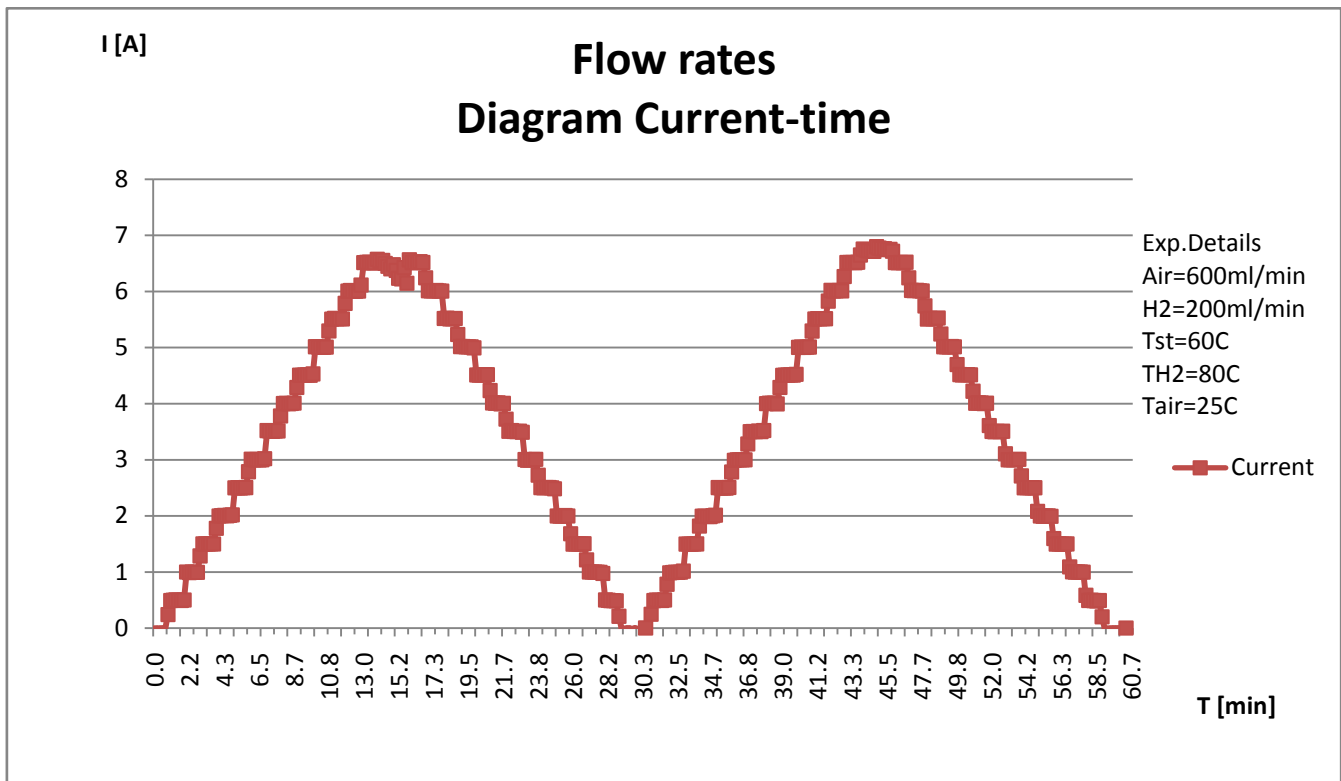
Σχ. 4.4. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=200 ml, Air=400 ml).



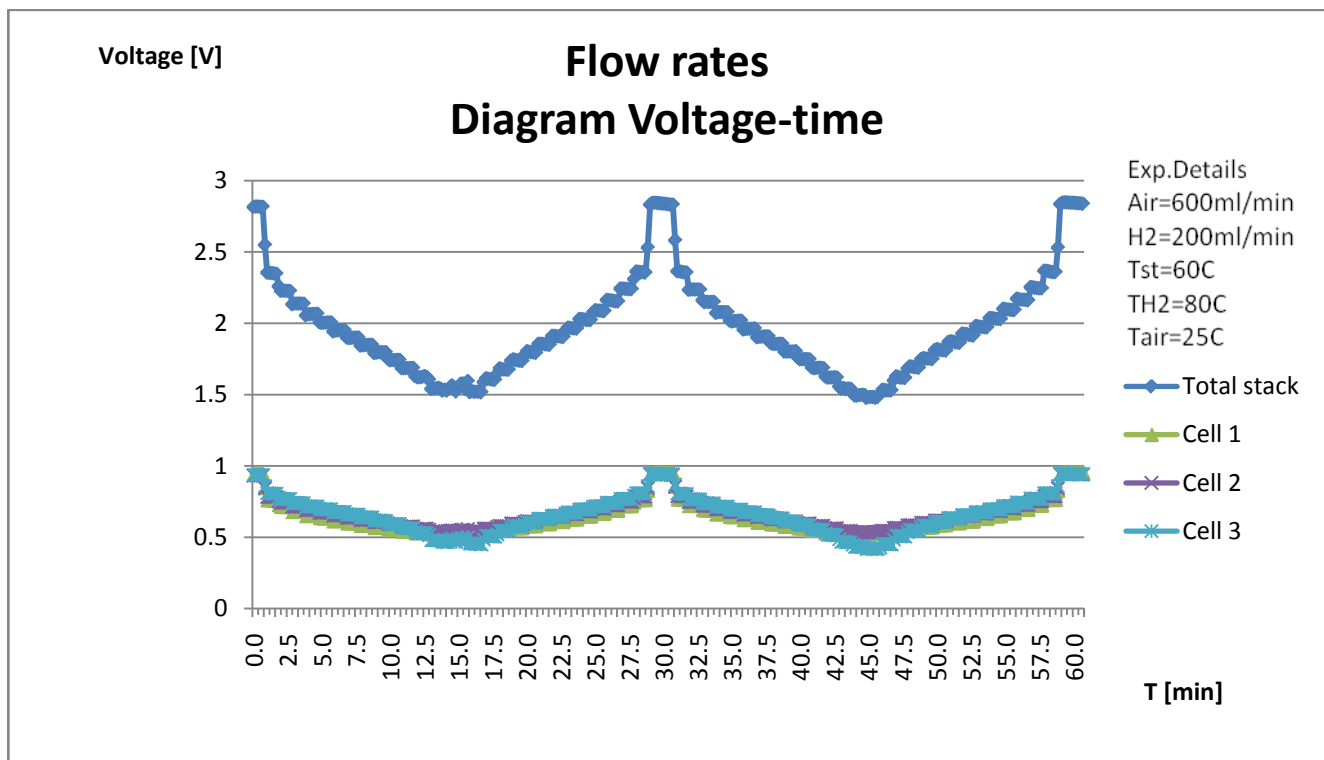
Σχ. 4.5. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=200 ml, Air=400 ml).



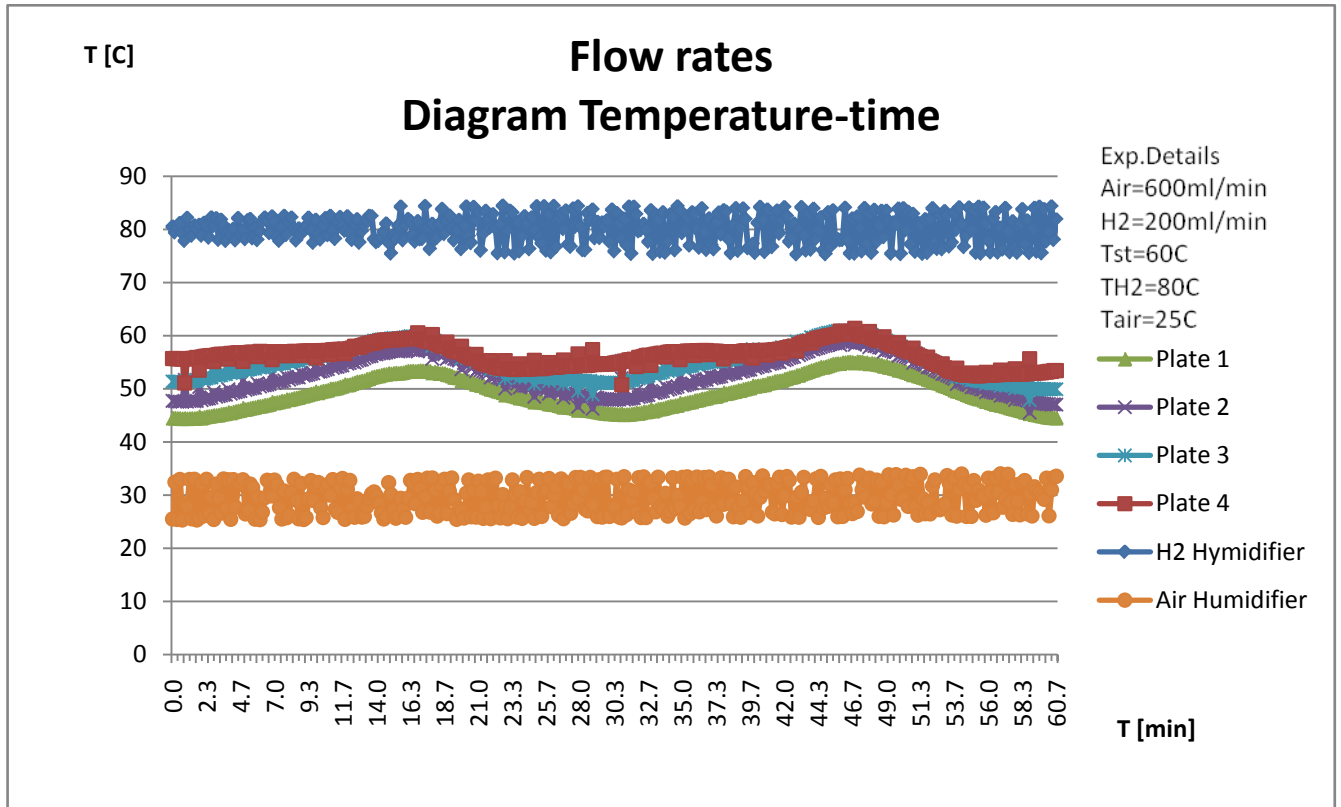
Σχ. 4.6. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=200 ml, Air=400 ml).



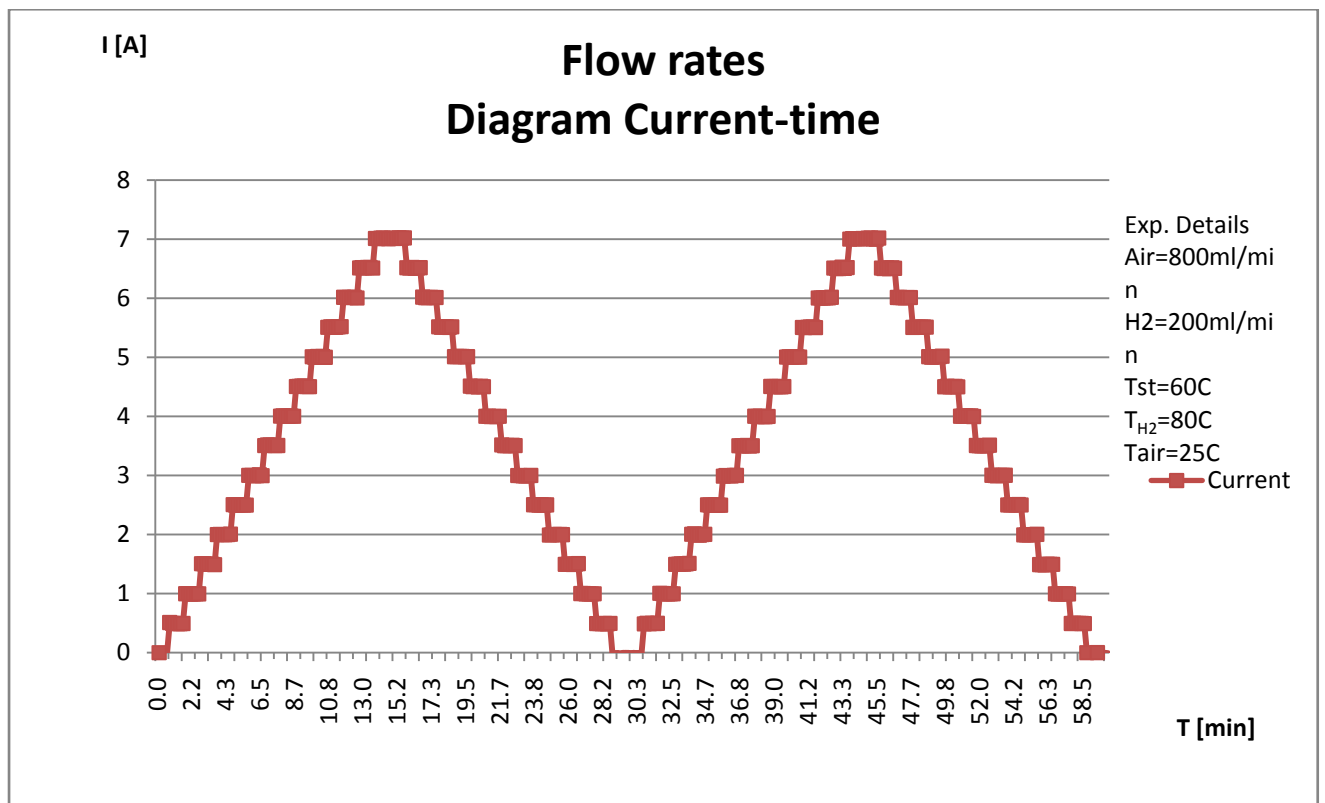
Σχ. 4.7. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=200 ml, Air=600 ml).



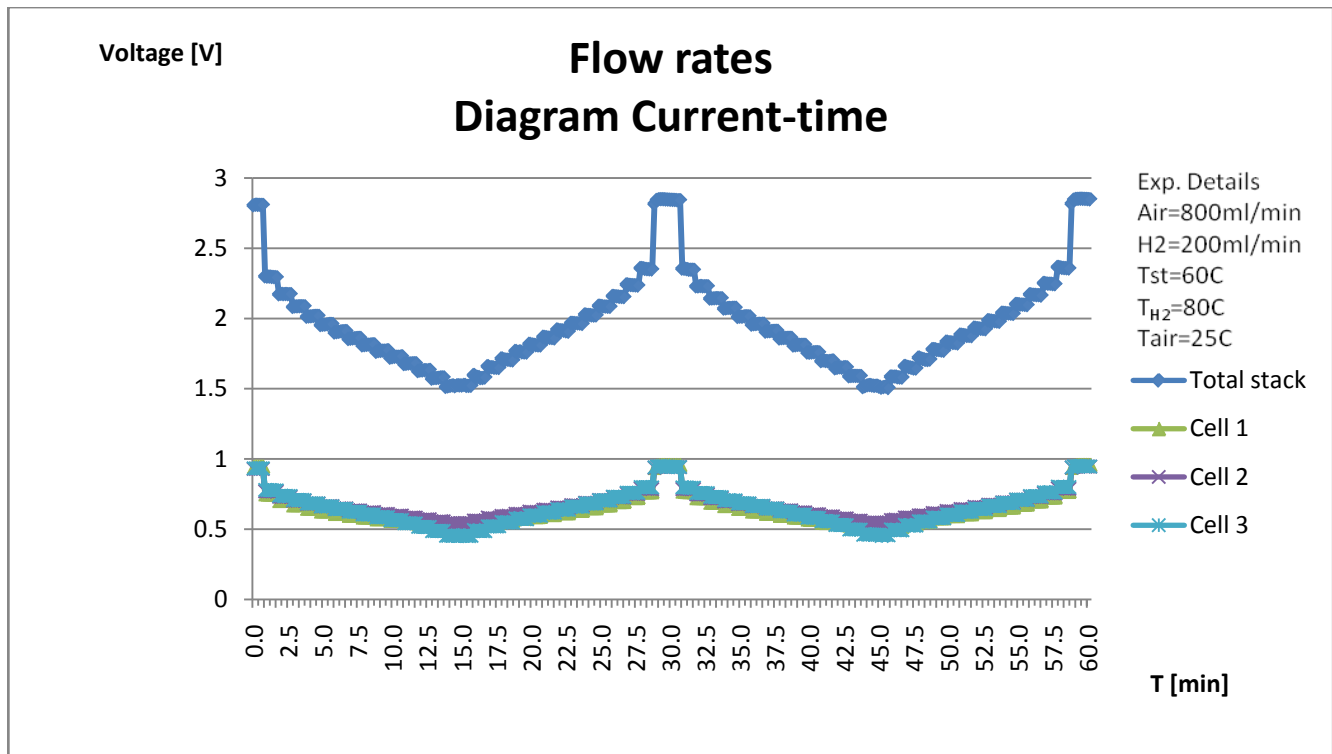
Σχ. 4.8. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=200 ml, Air=600 ml).



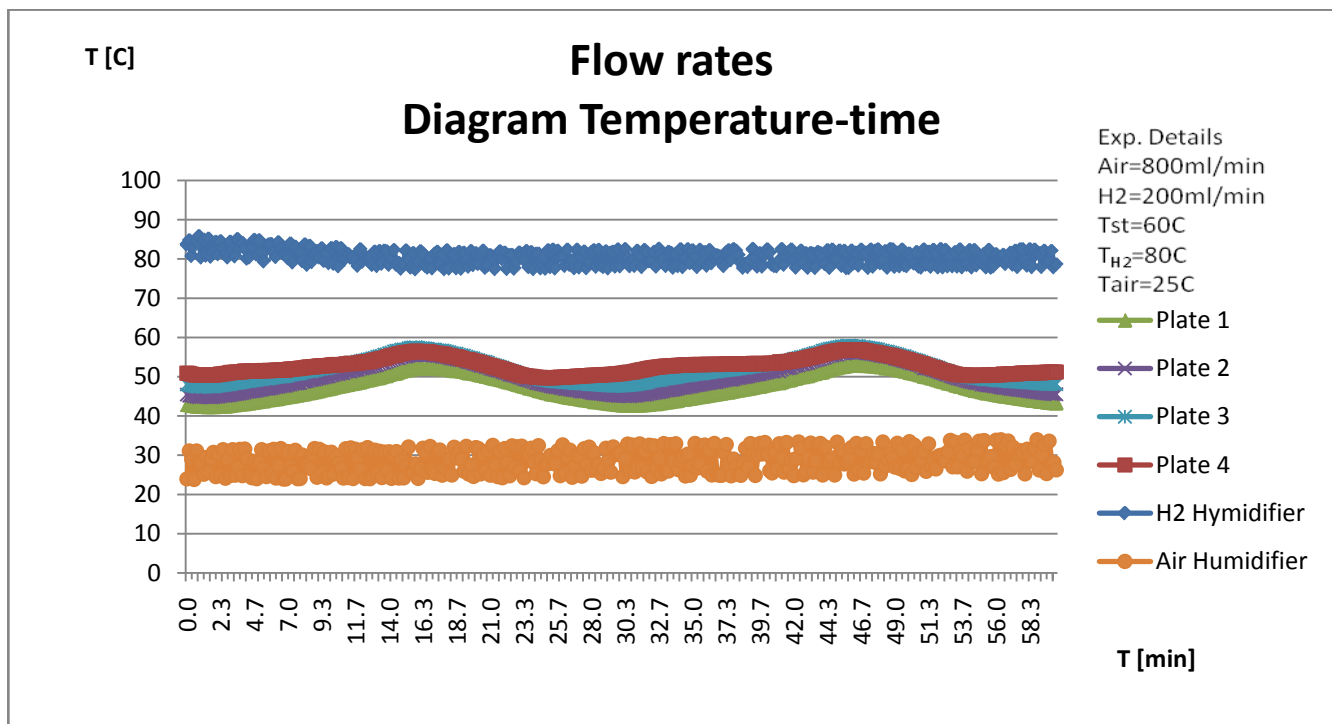
Σχ. 4.9. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=200 ml, Air=600 ml).



Σχ. 4.10. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=200 ml, Air=800 ml).



Σχ. 4.11. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=200 ml, Air=800 ml).

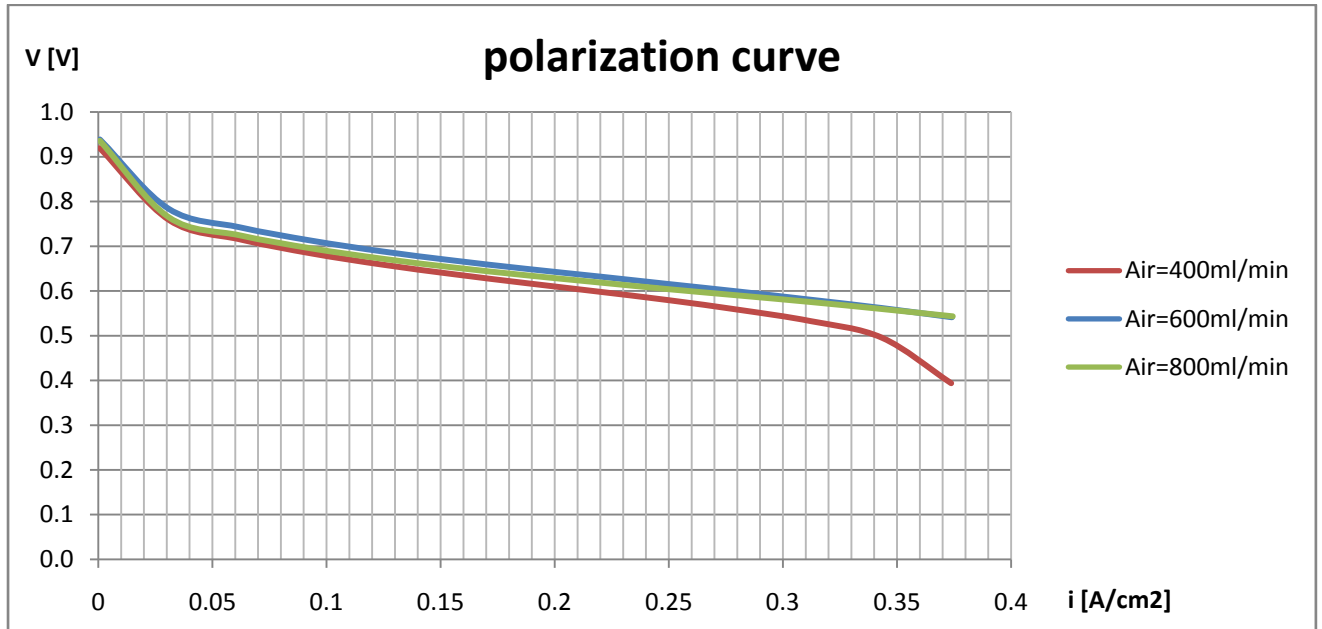


Σχ. 4.12. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=200 ml, Air=800 ml).

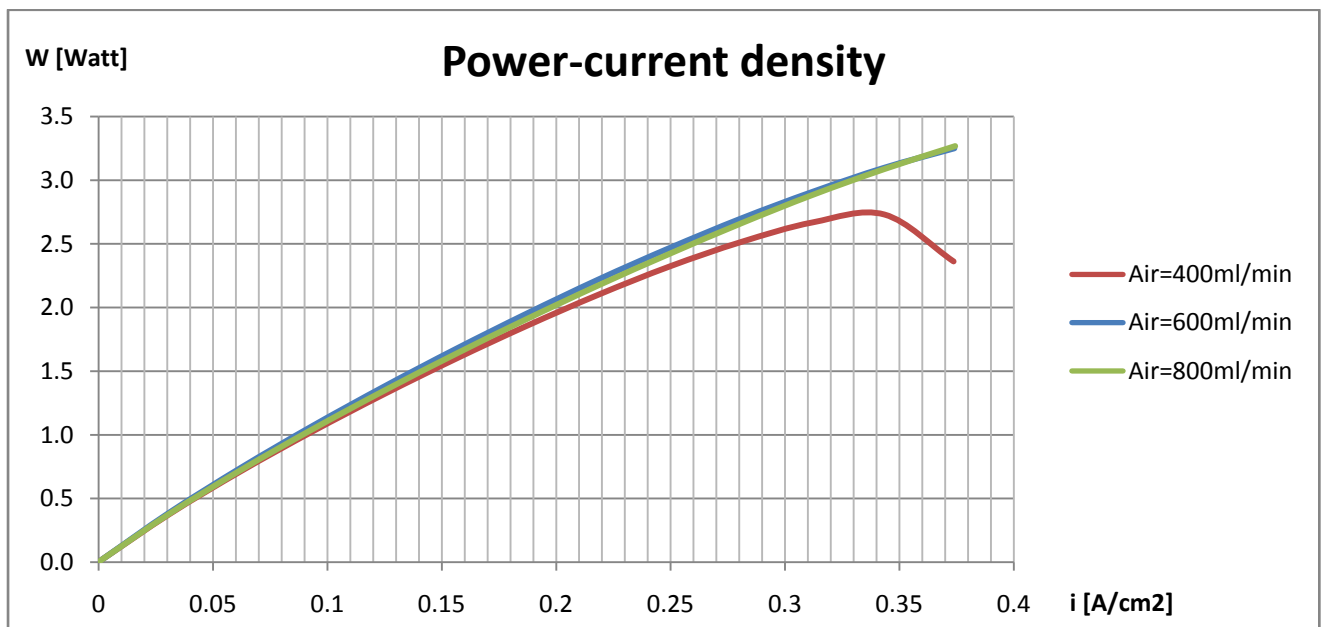
Κεφάλαιο 4 : Πειραματικά αποτελέσματα από την χρήση του δοκιμαστηρίου

Παρατηρήσεις – Σχόλια στα διαγράμματα παροχής αέρα

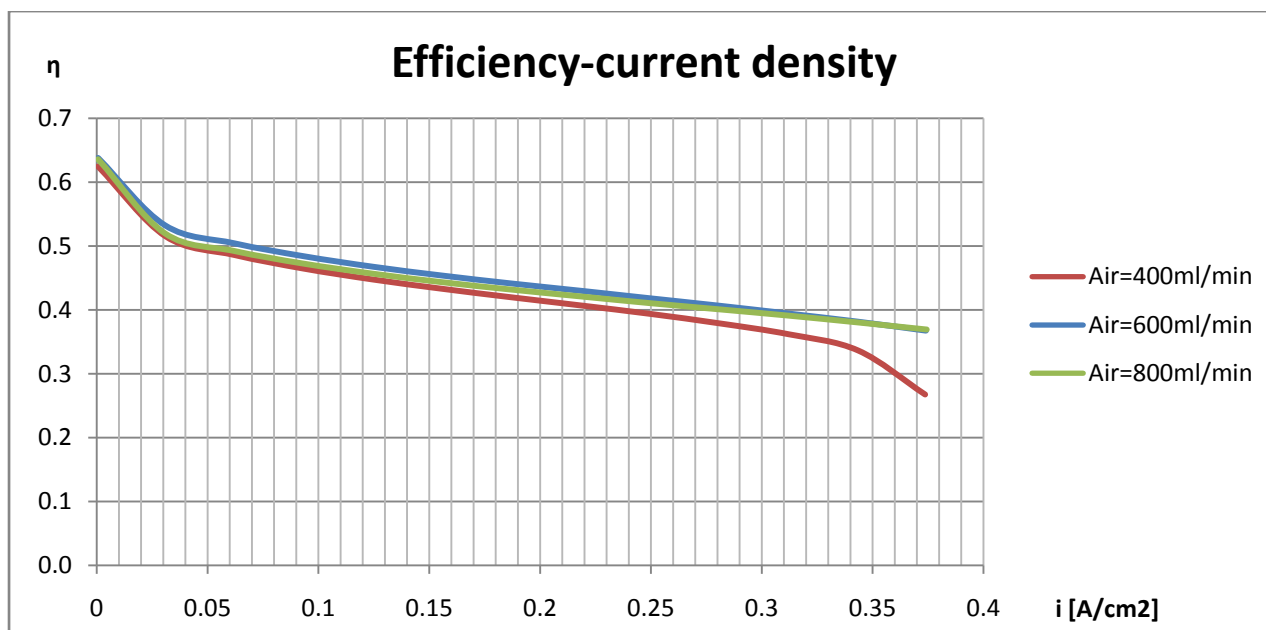
Σχεδιάζουμε τα διαγράμματα $i - V$, $i - P$, $i - \eta$ για τα δεδομένα των πειραμάτων που έχουμε από τα τρία πειράματα παροχής αέρα (400 ml/min, 600 ml/min, 800 ml/min) που εκτελέστηκαν παραπάνω.



Σχ. 4.13. Καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος για πειράματα παροχής αέρα.



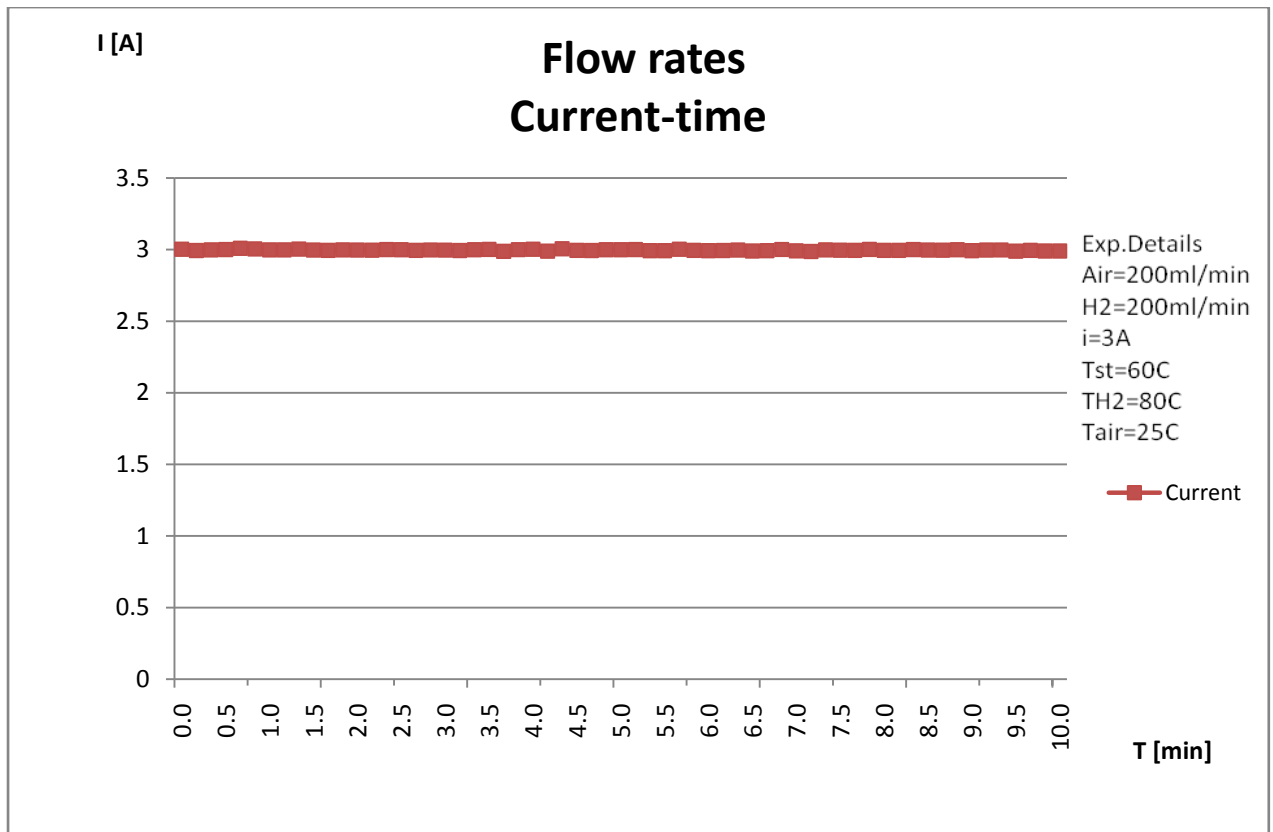
Σχ. 4.14. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για πειράματα παροχής αέρα.



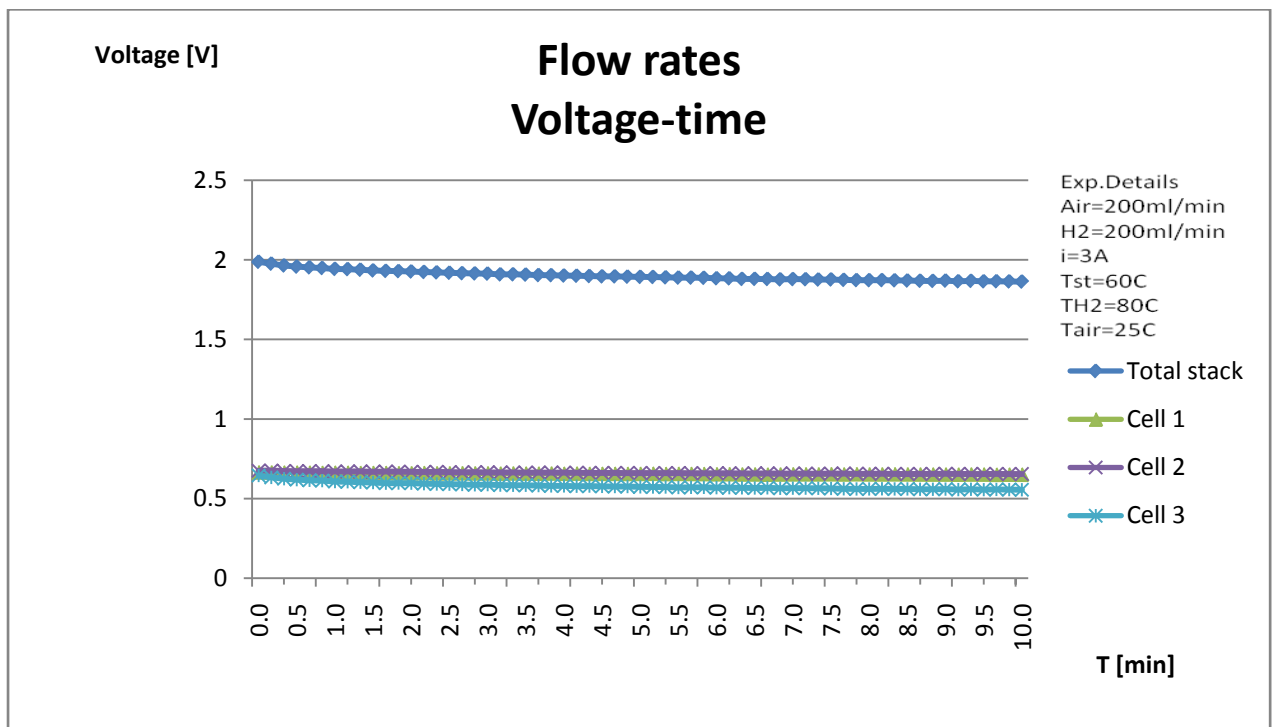
Σχ. 4.15. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για πειράματα παροχής αέρα.

Από τα διαγράμματα των Σχ. 4.13-4.15 μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της συστοιχίας κυψελών του δοκιμαστηρίου σε σχέση με την επίδραση που έχει στα διαγράμματα η μεταβολή της παροχής αέρα. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να αναδειχτούν παρόλο του ότι τα δεδομένα των διαγραμμάτων δεν εκτείνονται σε όλη την περιοχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου.

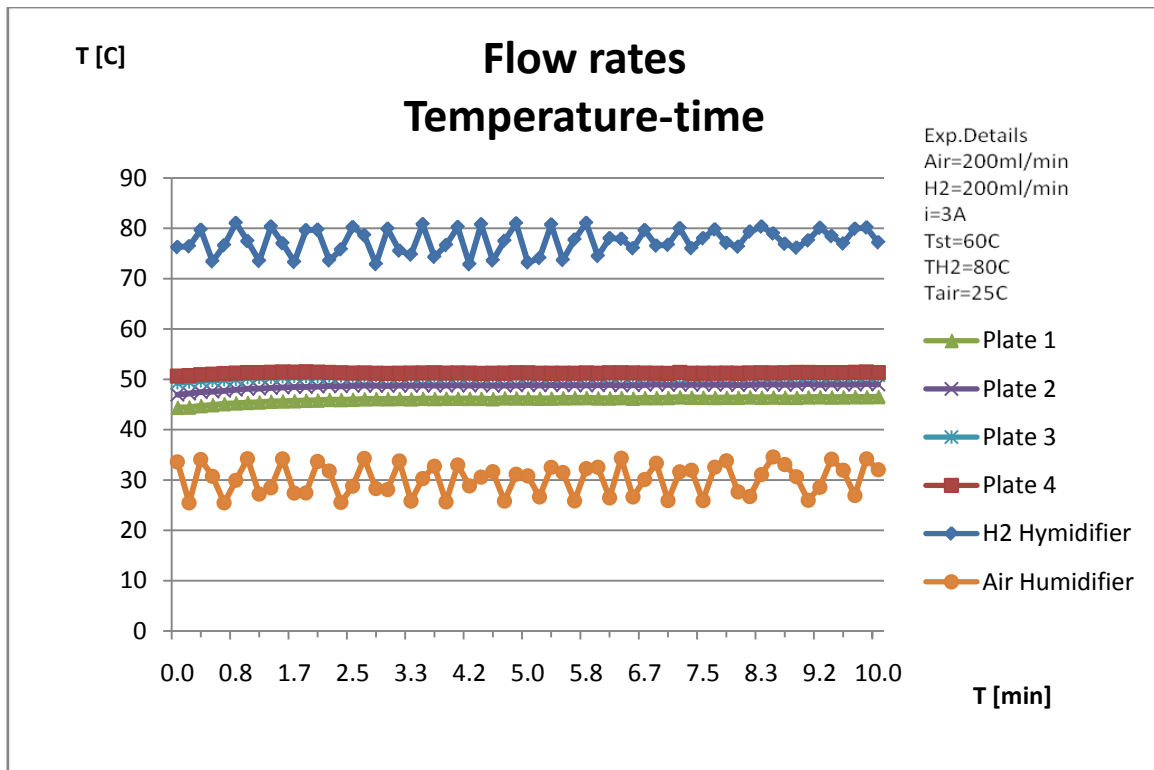
Όπως παρατηρούμε η καμπύλη της παροχής αέρα 400 ml/min παρουσιάζει από την πυκνότητα ρεύματος $i=0.34 A/cm^2$ την περιοχή της αποτόμου μεταβολής της τάσης (περιοχή απωλειών λόγω συγκέντρωσης) στο διάγραμμα του Σχ.4.13, ενώ στο διάγραμμα ισχύος – πυκνότητας ρεύματος παρατηρούμε ότι στην περιοχή του σημείου $0.34 A/cm^2$ η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστο. Οι άλλες δύο καμπύλες για τις παροχές 600 ml/min, 800 ml/min παρουσιάζουν μεταξύ τους παρόμοια συμπεριφορά και σχεδόν ταυτόσημες τιμές για όλη την περιοχή των διατιθέμενων πυκνοτήτων ρεύματος. Η συμπεριφορά της καμπύλης τάσης – πυκνότητας ρεύματος για παροχή αέρα 400 ml/min είναι ασυνήθιστη σύμφωνα πάντα με τις διαθέσιμες βιβλιογραφικές αναφορές μιας και η περιοχή των απωλειών λόγω συγκέντρωσης εμφανίζεται πολύ νωρίς $i=0.34 A/cm^2$ συγκριτικά με την βιβλιογραφία που συμβαίνει στην περιοχή του $i=0.65 A/cm^2$.



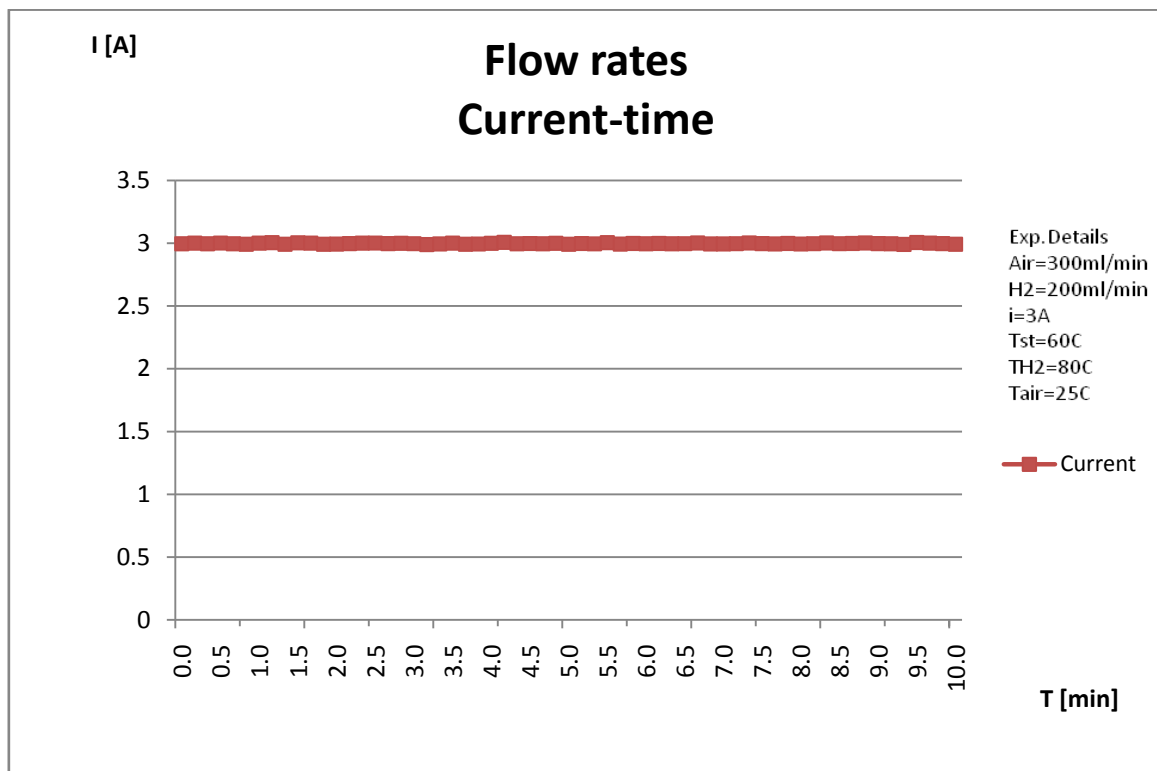
Σχ. 4.16. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=200 ml, Air=200 ml, i=3 A).



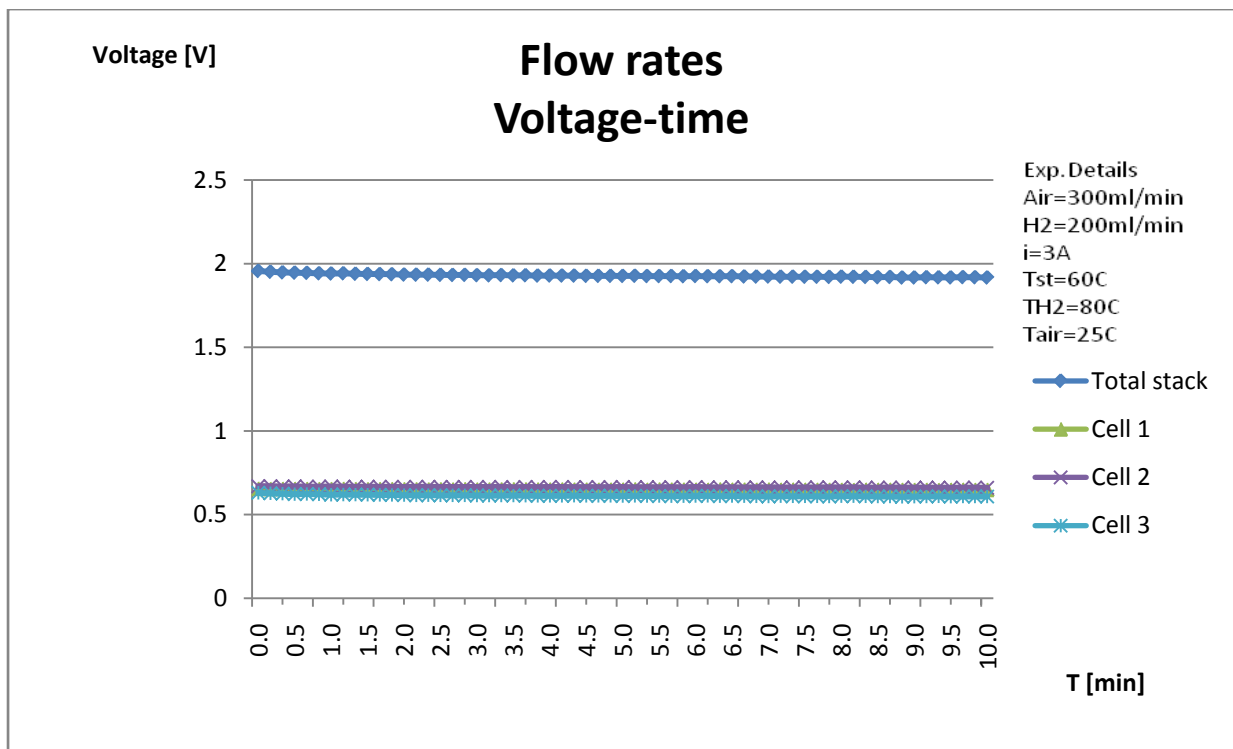
Σχ. 4.17. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=200 ml, Air=200 ml, i=3 A).



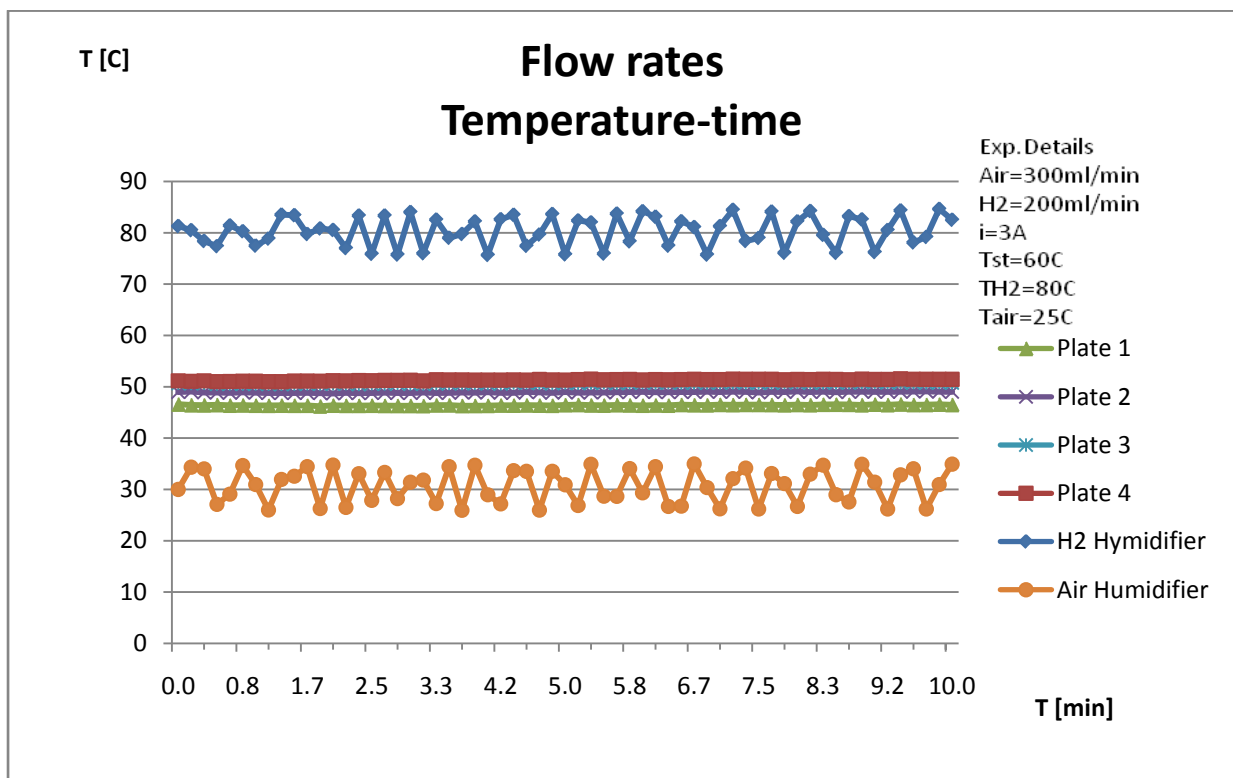
Σχ. 4.18. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=200 ml, Air=200 ml, i=3 A).



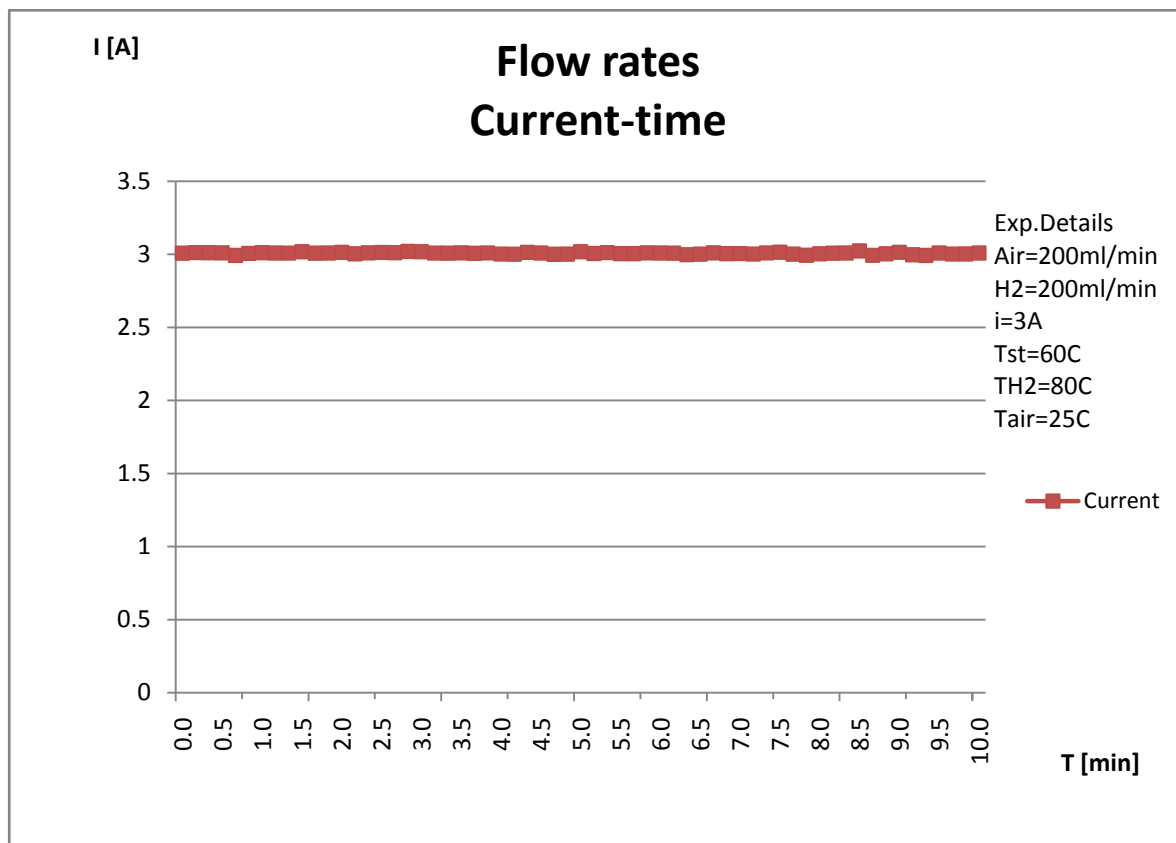
Σχ. 4.19. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=200 ml, Air=300 ml, i=3 A).



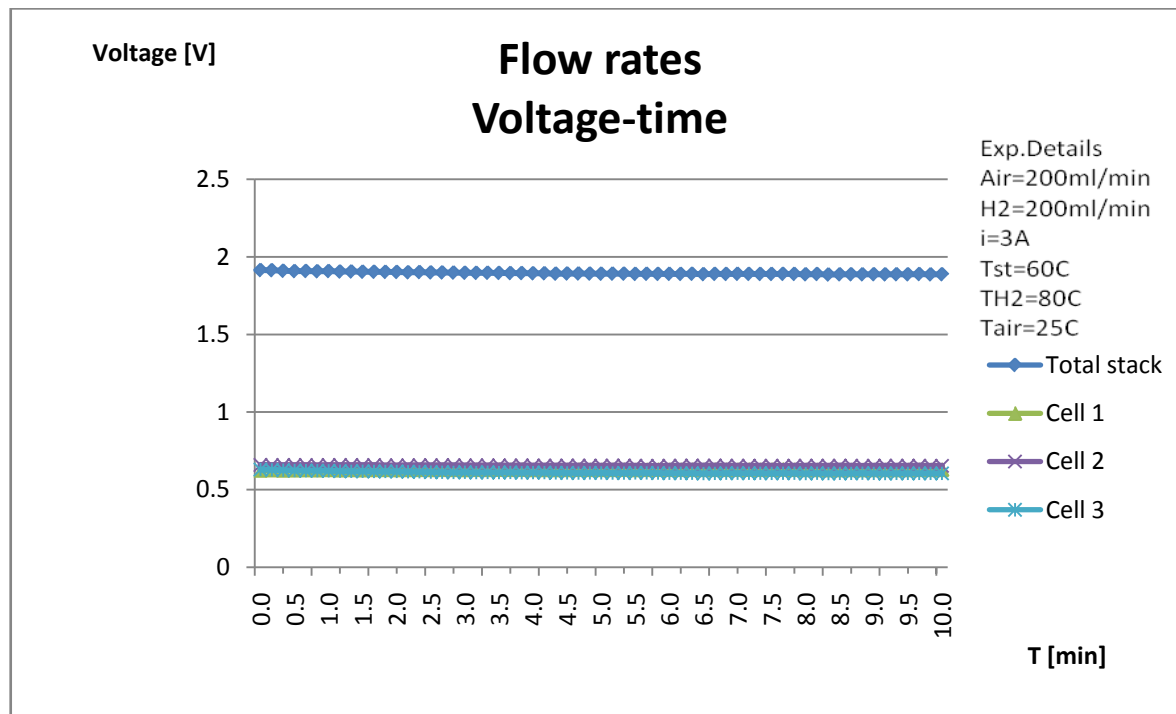
Σχ. 4.20. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=200 ml, Air=300 ml, i=3 A).



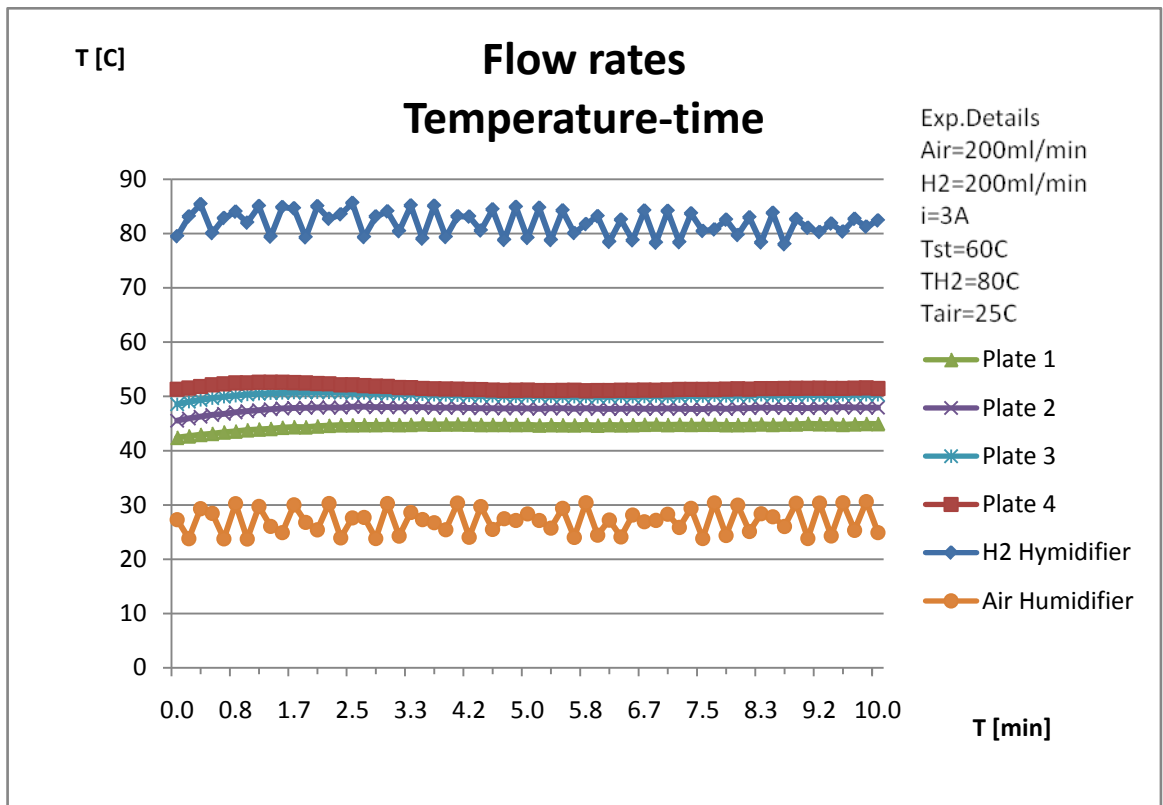
Σχ. 4.21. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=200 ml, Air=300 ml, i=3 A).



Σχ. 4.22. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=200 ml, Air=400 ml, i=3 A).



Σχ. 4.23. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=200 ml, Air=400 ml, i=3 A).



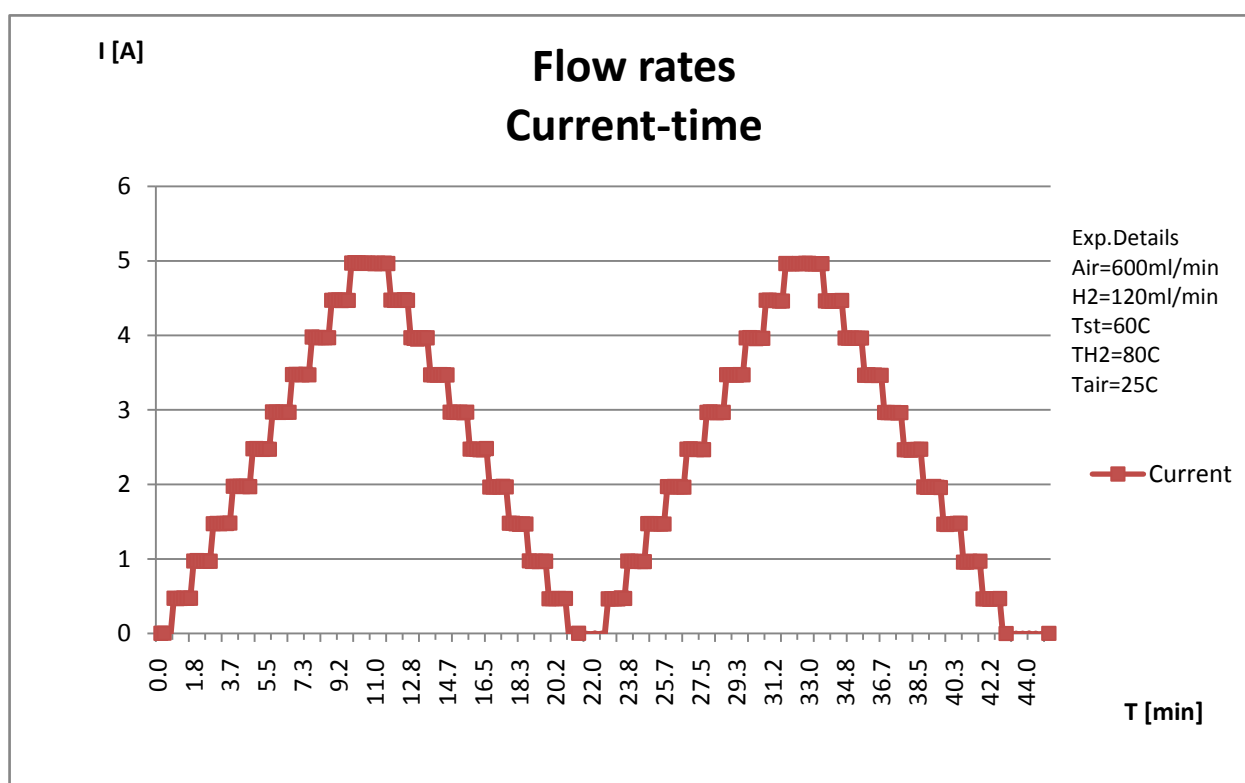
Σχ. 4.24. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=200 ml, Air=400 ml, i=3 A).

4.3 Πείραμα παροχής αντιδρώντων αερίων – Πείραμα υδρογόνου

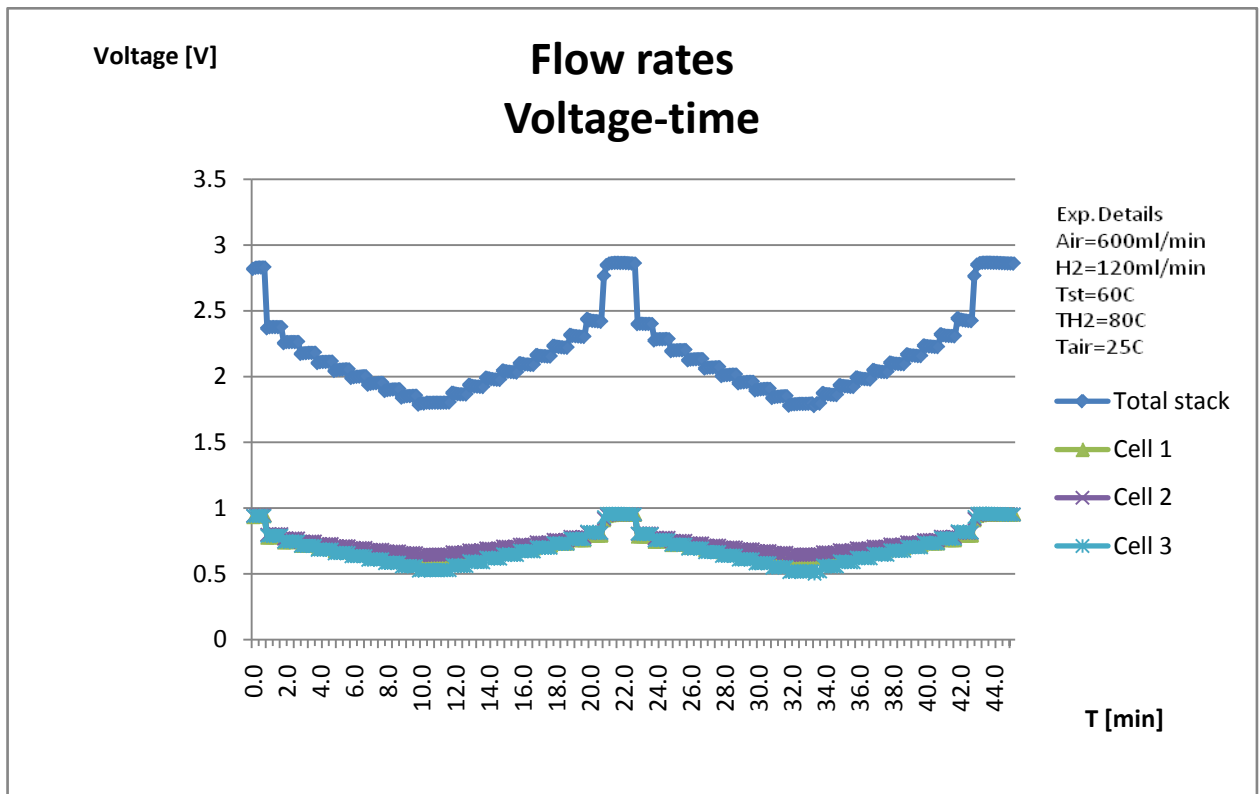
Σε αυτό το πείραμα διατηρείται σταθερή η παροχή αέρα στα 600 ml/min, ενώ η παροχή του υδρογόνου μεταβάλλεται και παίρνει τις τιμές 120 ml/min, 160 ml/min, 200 ml/min. Σε κάθε πείραμα εκτελούνται 2 κλίμακες ρεύματος με βήμα 0,5 A και διάρκεια 1 min. Στο πρώτο πείραμα το μέγιστο ρεύμα είναι 5 A ενώ στα δύο άλλα είναι 7 A. Στην συνέχεια παρατίθενται τα σχετικά διαγράμματα.

Πίνακας 4.3. Περιγραφή συνθηκών πειράματος παροχής υδρογόνου.

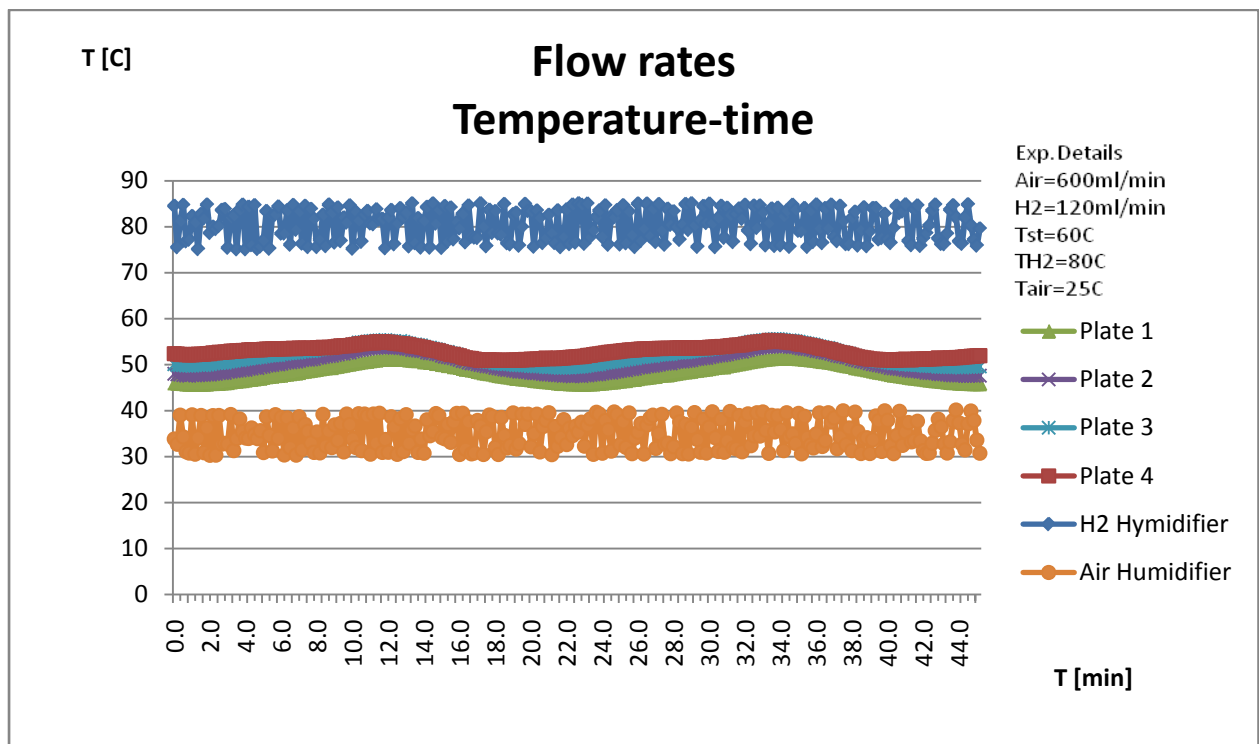
Πείραμα 2 - Παροχή Υδρογόνου												
	Παροχή H ₂	Παροχή Αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
			Αρχική τιμή	Τελική τιμή	Βήμα			Συστοιχίας Κυψελών	Υγραντήρα H ₂	Υγραντήρα Αέρα	H ₂	Αέρα
	ml/min	ml/min	A	A	A	-	min	°C	°C	°C	psig	psig
1	120	600	0	5	0.5	2	1	60	80	25	0	0
2	160	600	0	7	0.5	2	1	60	80	25	0	0
3	200	600	0	7	0.5	2	1	60	80	25	0	0



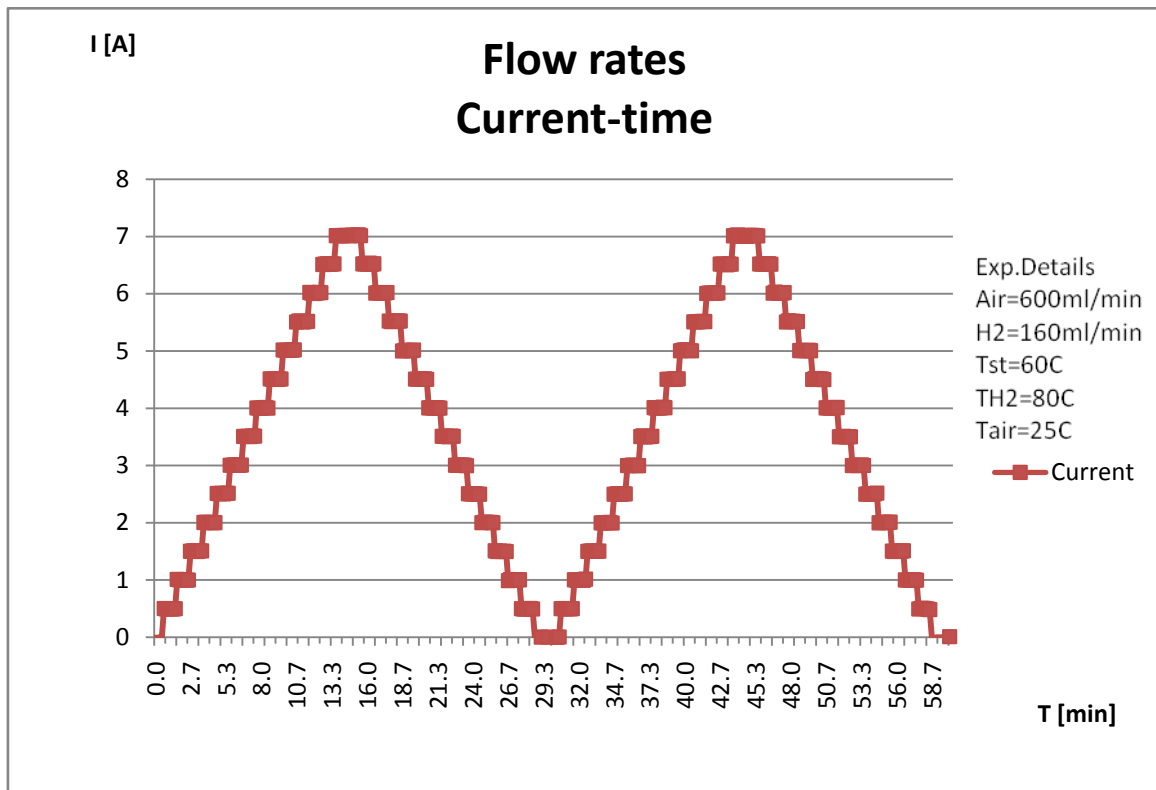
Σχ. 4.25. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=120 ml, Air=600 ml).



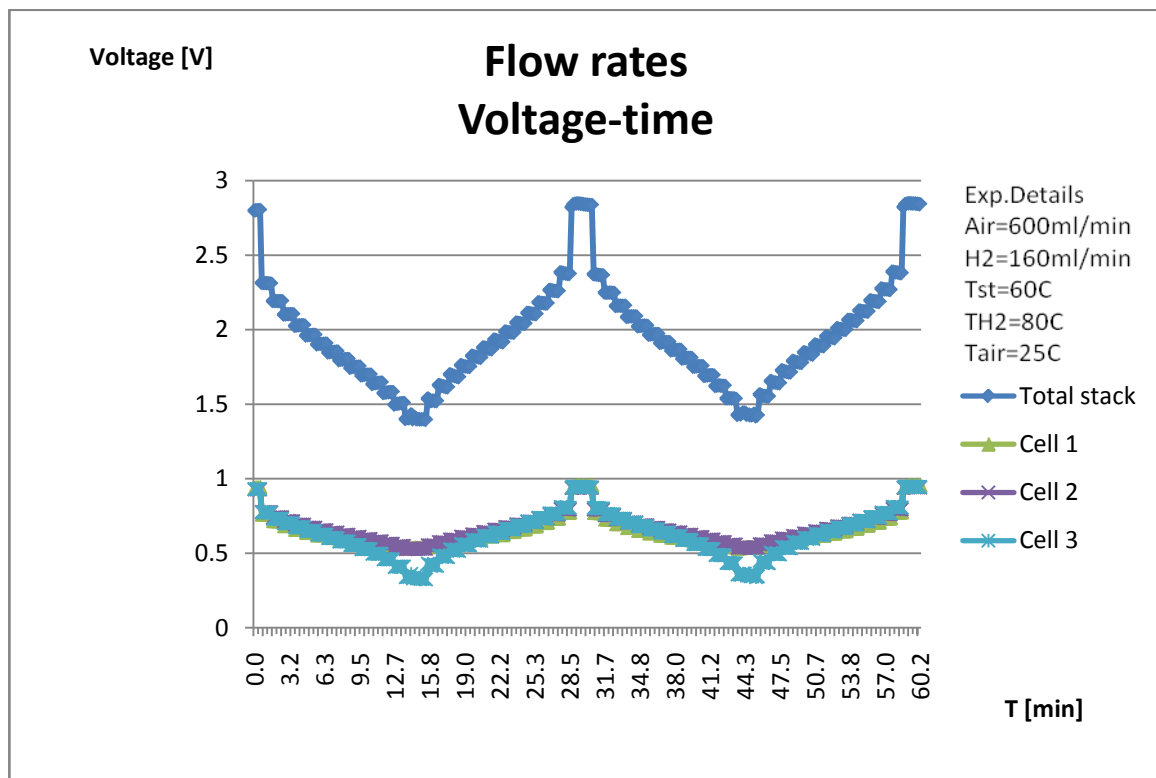
Σχ. 4.26. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=120 ml, Air=600 ml).



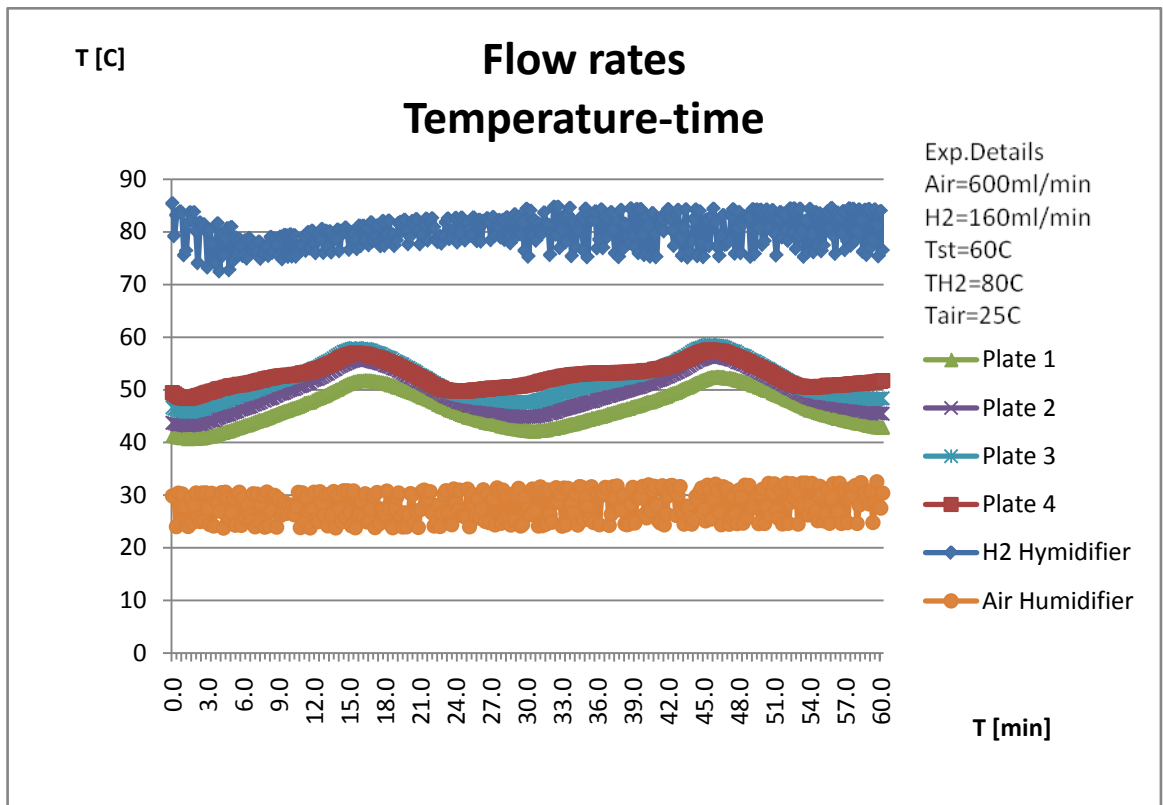
Σχ. 4.27. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=120 ml, Air=600 ml).



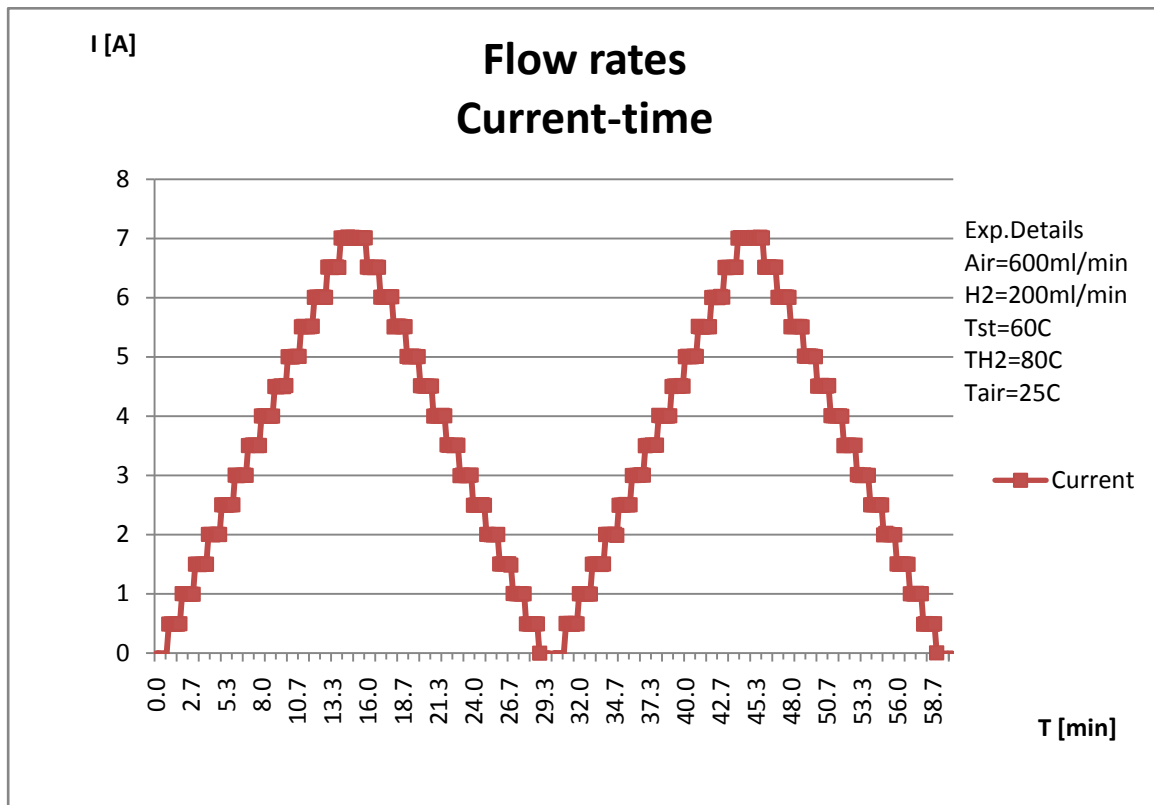
Σχ. 4.28. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml).



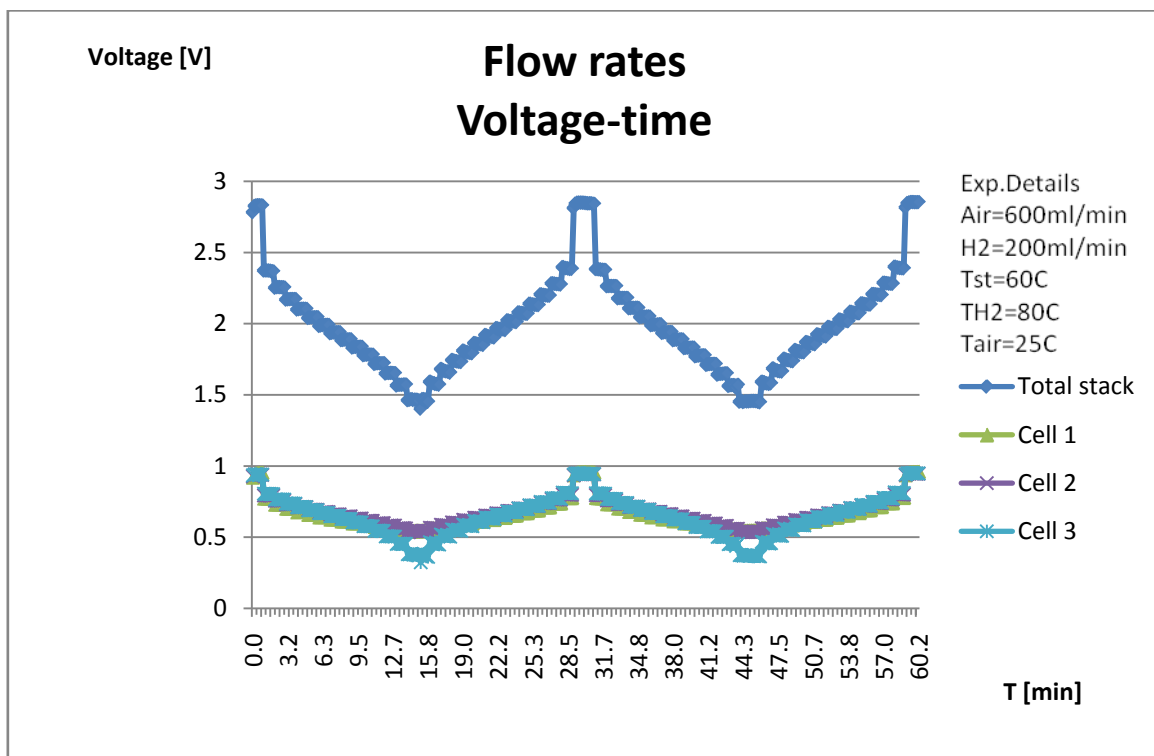
Σχ. 4.29. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml).



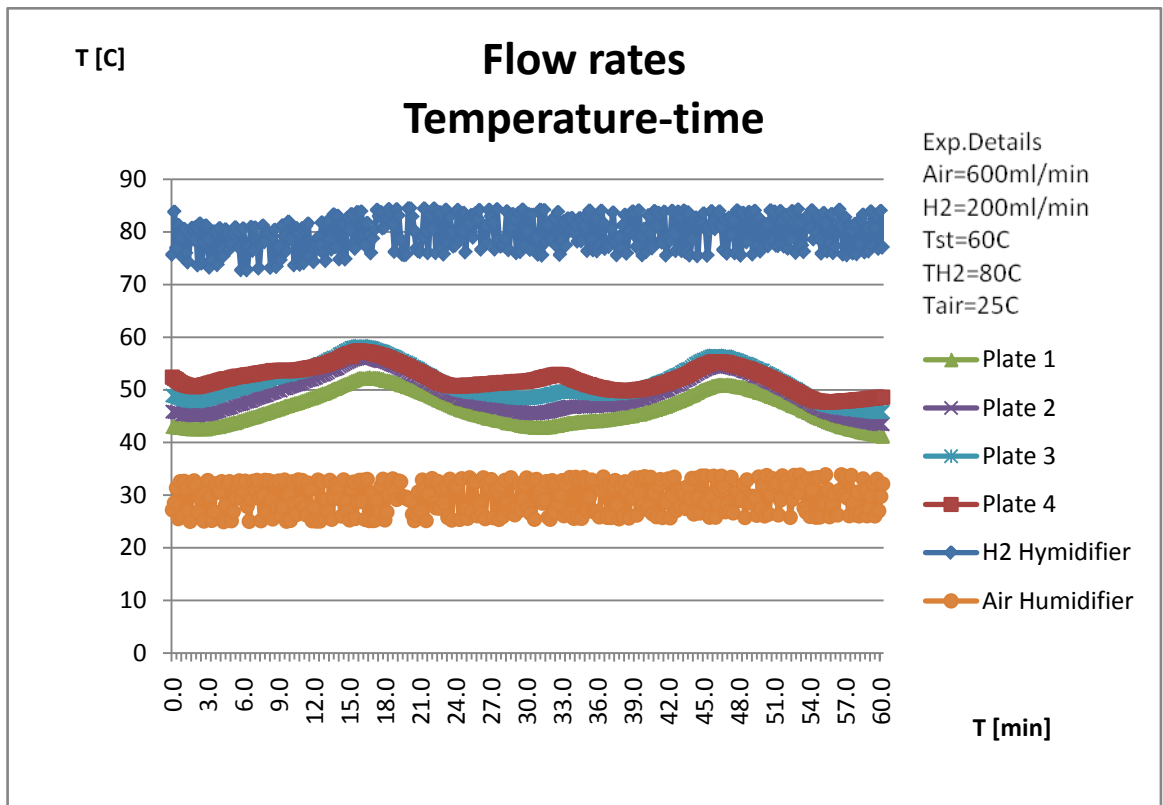
Σχ. 4.30. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml).



Σχ. 4.31. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=200 ml, Air=600 ml).



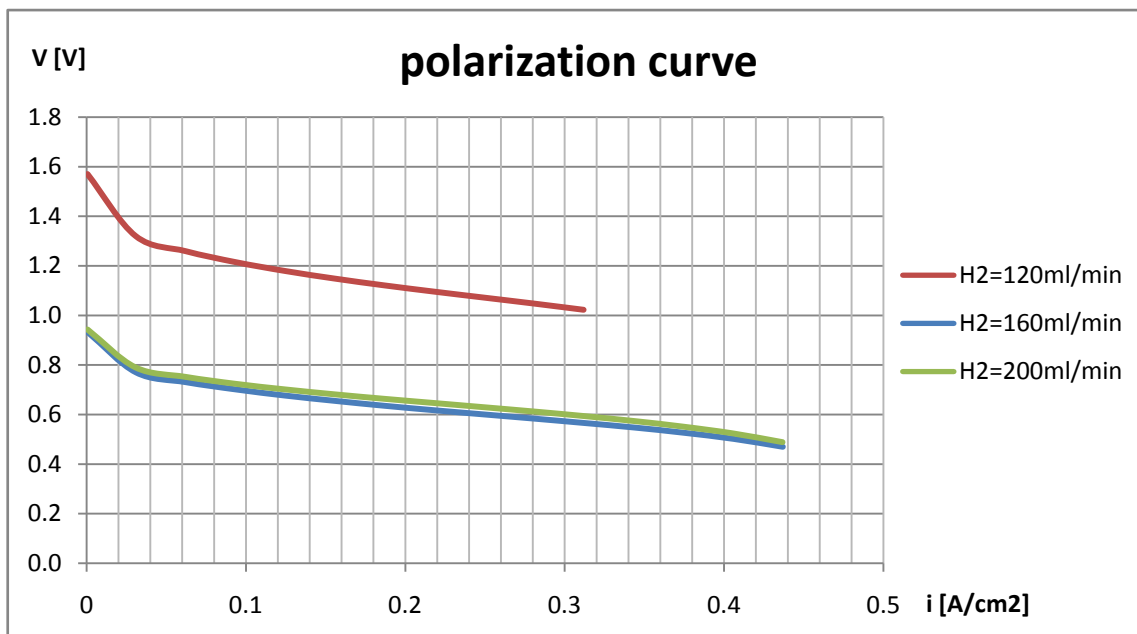
Σχ. 4.32. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=200 ml, Air=600 ml).



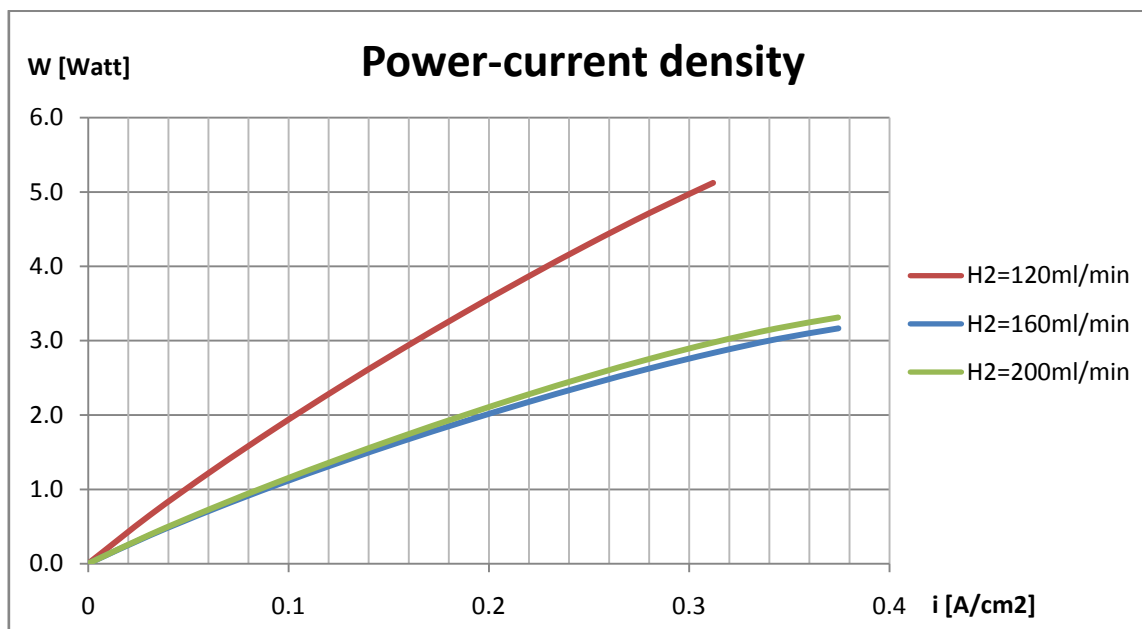
Σχ. 4.33. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=200 ml, Air=600 ml).

Παρατηρήσεις – Σχόλια στα διαγράμματα παροχής υδρογόνου

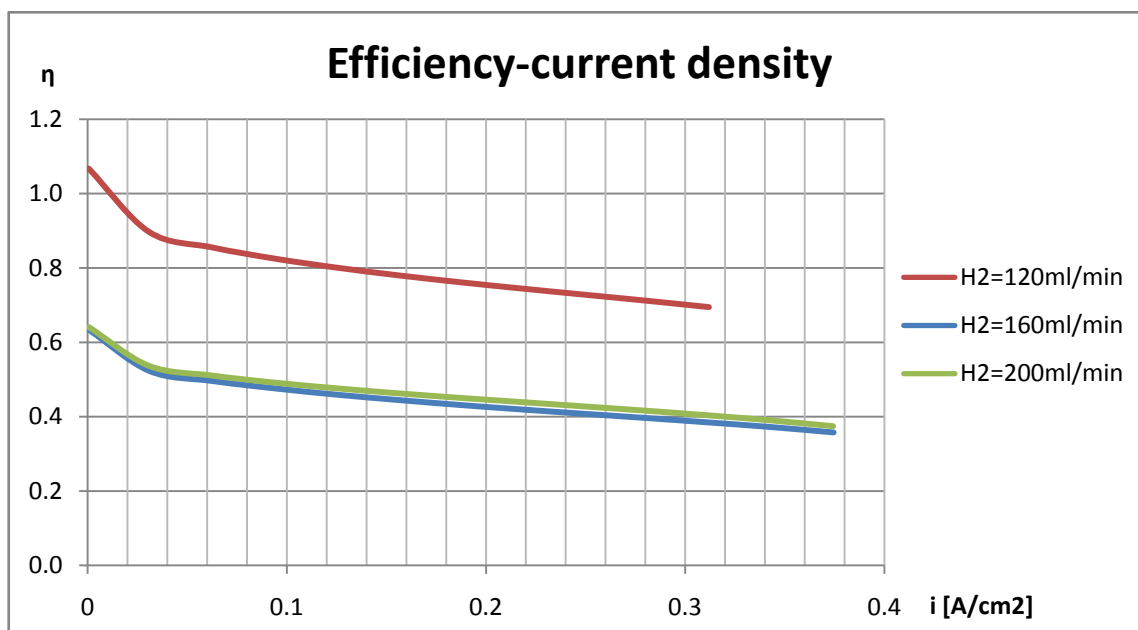
Σχεδιάζουμε τα διαγράμματα $i - V$, $i - P$, $i - \eta$ για τα δεδομένα των πειραμάτων που έχουμε από τα τρία πειράματα παροχής αέρα (120 ml/min, 160 ml/min, 200 ml/min) που εκτελέστηκαν παραπάνω.



Σχ. 4.34. Καμπύλη τάσης πυκνότητας ρεύματος για πειράματα παροχής υδρογόνου.



Σχ. 4.35. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για πειράματα παροχής υδρογόνου.



Σχ. 4.36. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για πειράματα παροχής υδρογόνου.

Από τα διαγράμματα των Σχ. 4.34 - 4.36 μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά της συστοιχίας κυψελών του δοκιμαστηρίου σε σχέση με την επίδραση που έχει στα διαγράμματα η μεταβολή της παροχής υδρογόνου. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να αναδειχτούν παρόλο του ότι τα δεδομένα των διαγραμμάτων δεν εκτείνονται σε όλη την περιοχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου.

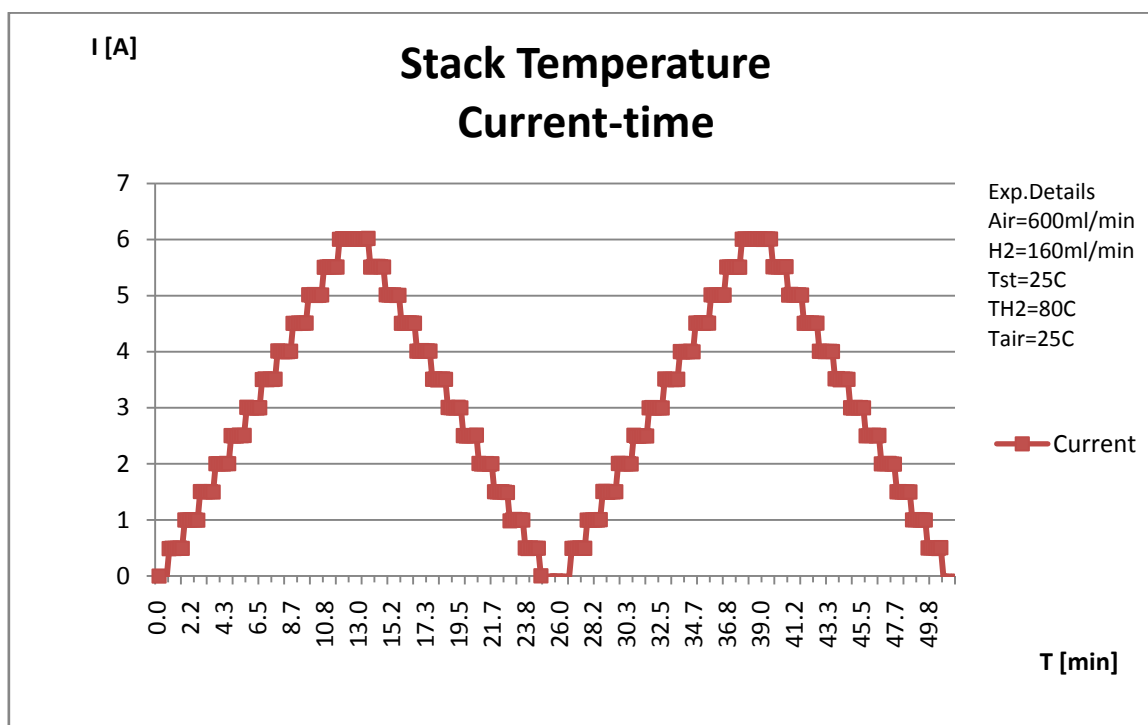
Όπως παρατηρούμε η καμπύλη της παροχής υδρογόνου 120 ml/min είναι πολύ παραπάνω από τις υπόλοιπες καμπύλες ενώ οι καμπύλες για παροχές 160 ml/min, 200 ml/min παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με σχεδόν ταυτόσημες τιμές. Ίσως χρειάζονται και άλλα πειράματα με ενδιάμεσες τιμές των παροχών 120 ml/min και 160 ml/min για να δοθεί σαφής εξήγηση.

4.4 Πείραμα θερμοκρασιών συστοιχίας

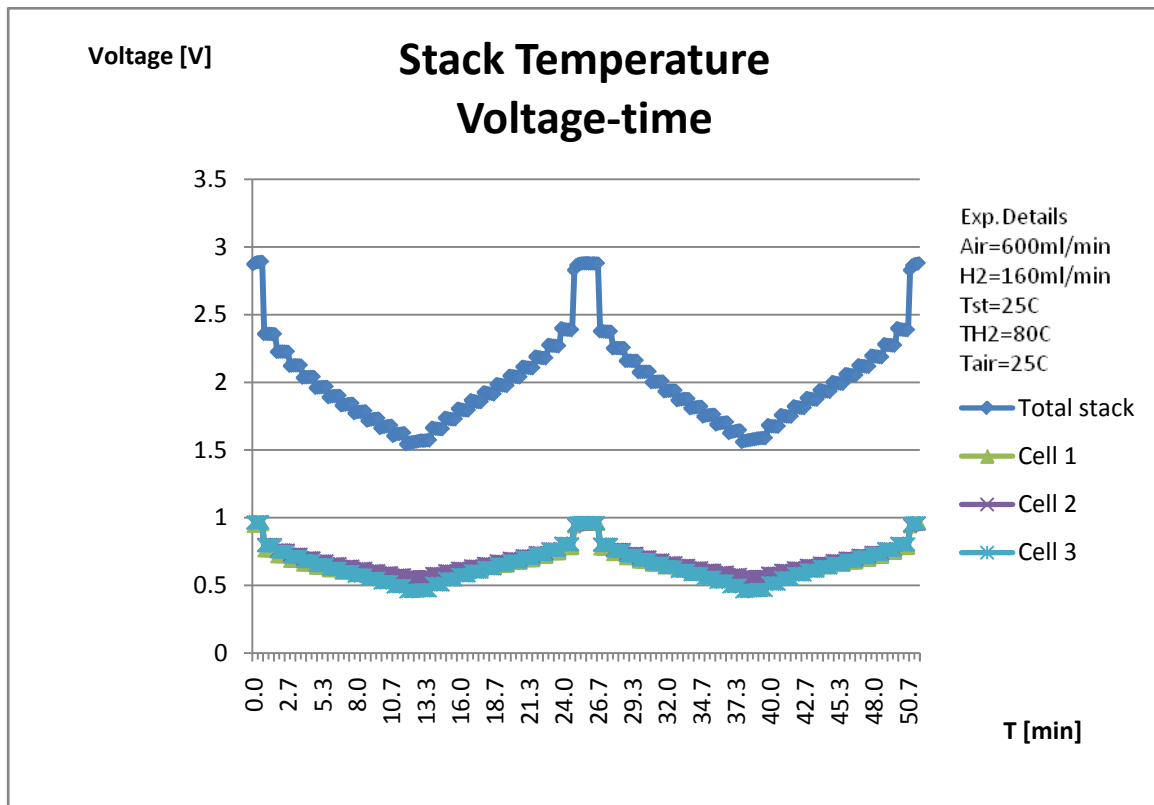
Στο πείραμα αυτό εξετάζεται η συμπεριφορά της κυψέλης σε διάφορες θερμοκρασίες της συστοιχίας. Η κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης λειτουργούν αποδοτικότερα σε θερμοκρασίες 50°C-100°C. Στο πείραμα αυτό εξετάζονται οι θερμοκρασίες της κυψέλης 25°C, 60°C, 70°C. Οι παροχή του αέρα είναι 600 ml/min και του υδρογόνου 160 ml/min. Εκτελούνται για κάθε μια θερμοκρασία της συστοιχίας δύο κλίμακες ρεύματος με μέγιστο ρεύμα 6 A, με βήμα 0,5 A και χρονική διάρκεια βήματος 1 min. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε διαγράμματα των βασικών μεγεθών.

Πίνακας 4.4. Περιγραφή συνθηκών πειράματος θερμοκρασιών συστοιχίας.

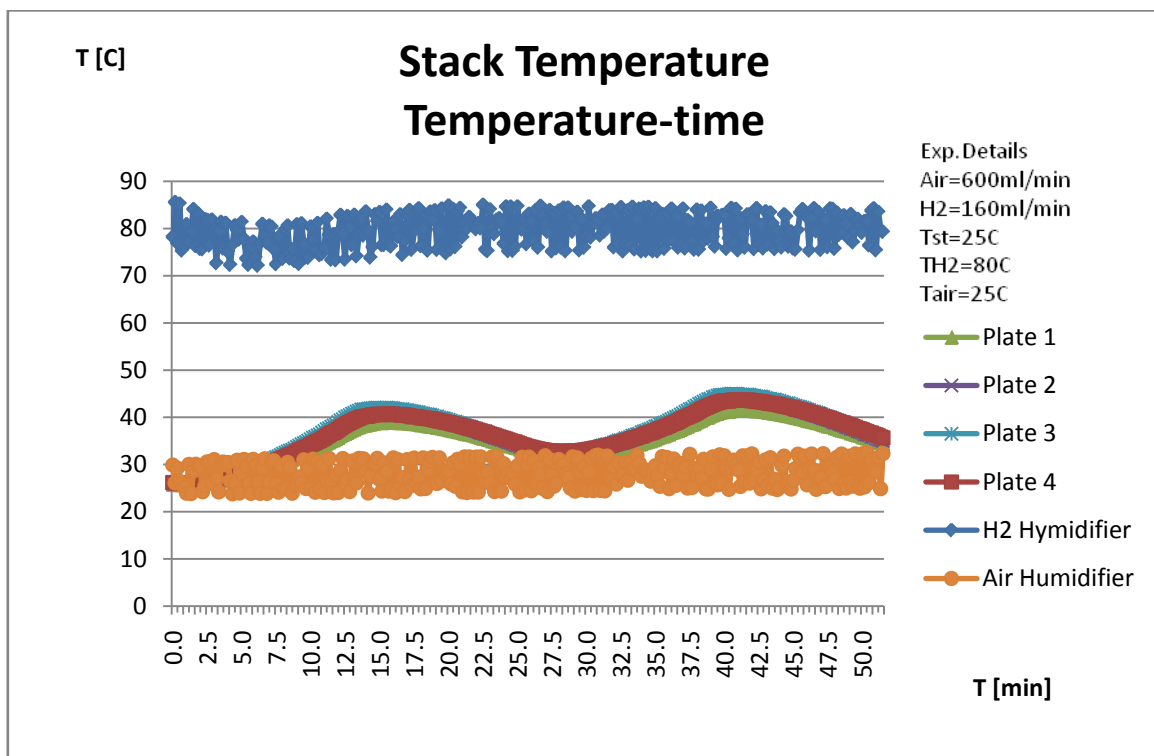
Experiment II Stack Temperatures												
	Παροχή H ₂	Παροχή Αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
			Αρχική τιμή ρεύματος	Τελική τιμή ρεύματος	Βήμα			Συστοιχίας Κυψελών	Υγραντήρα H ₂	Υγραντήρα Αέρα	H ₂	Αέρα
	ml/min	ml/min	A	A	A	-	min	°C	°C	°C	psig	psig
1	160	600	0	6	0.5	2	1	25	80	25	-	-
2	160	600	0	6	0.5	2	1	60	80	25	-	-
3	160	600	0	6	0.5	2	1	70	80	25	-	-



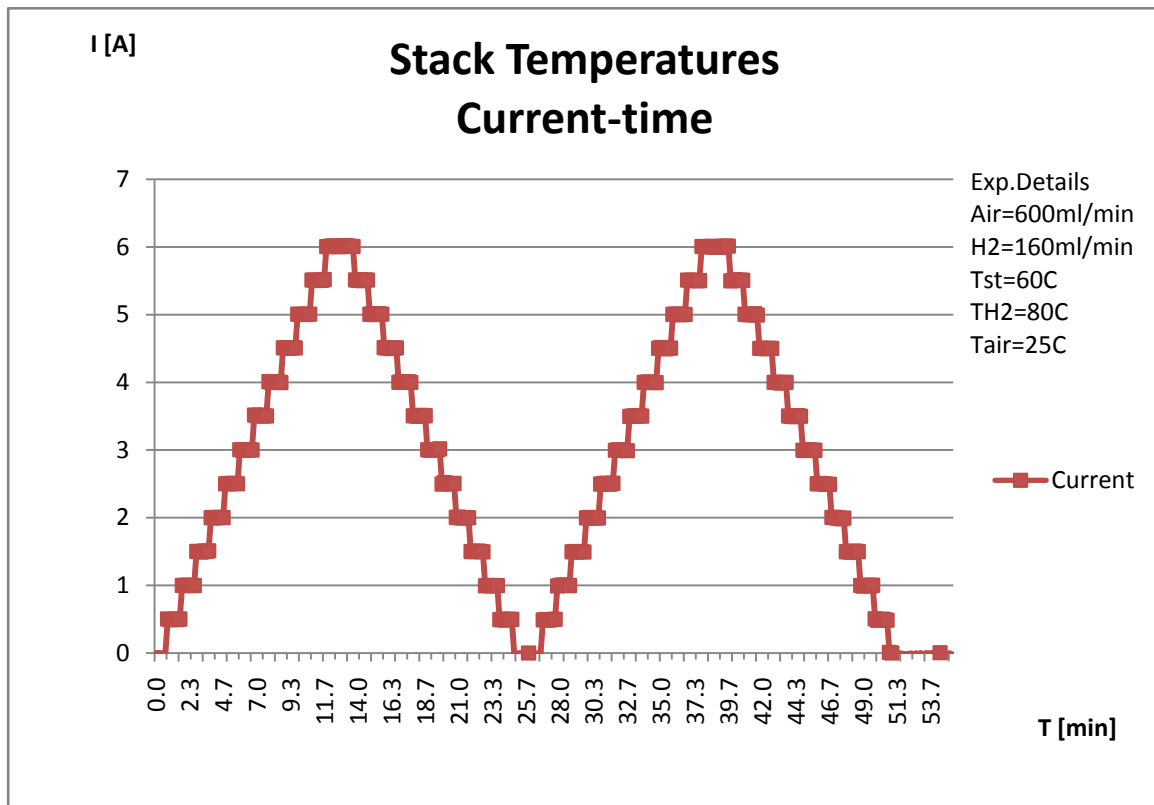
Σχ. 4.37. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=25°C).



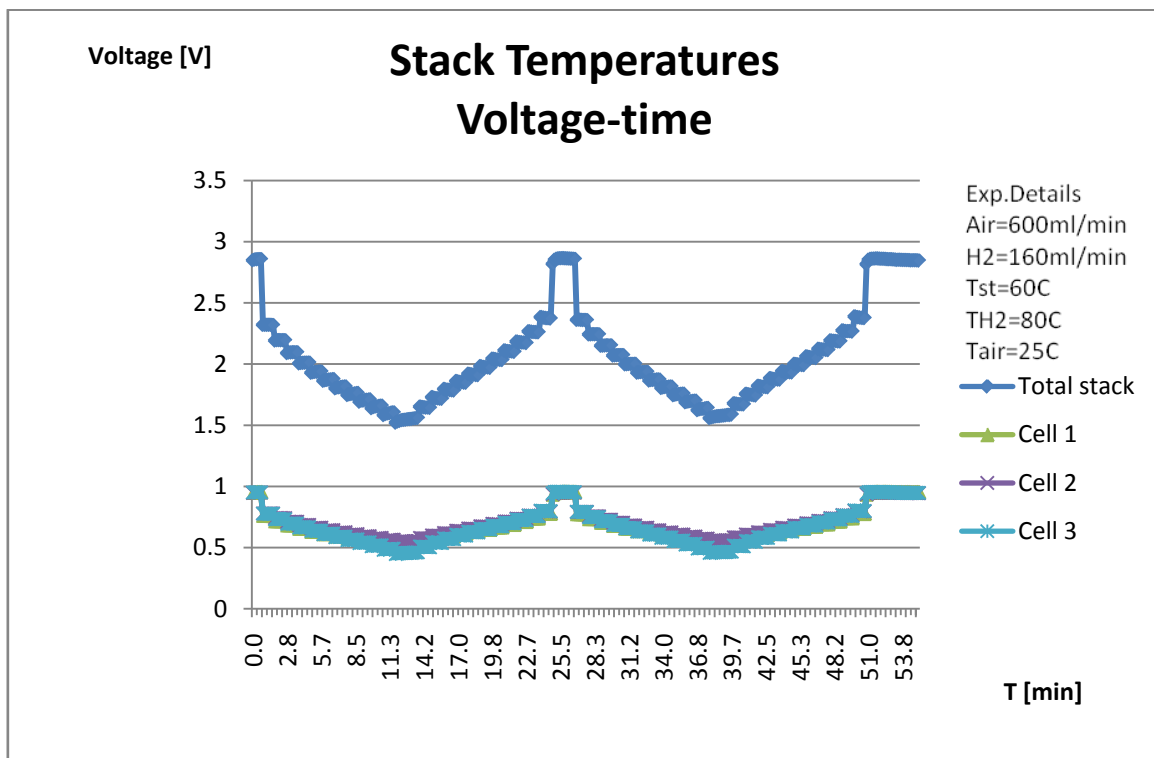
Σχ. 4.38. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=25°C).



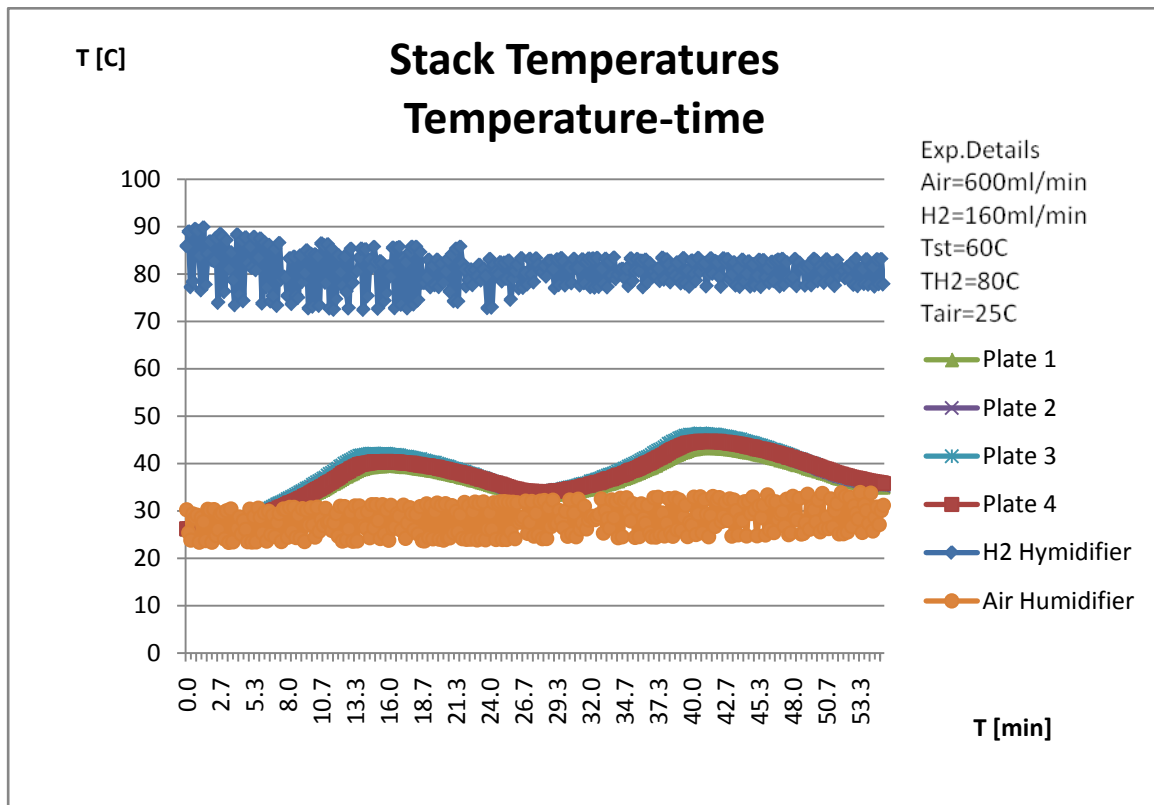
Σχ. 4.39. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=25°C).



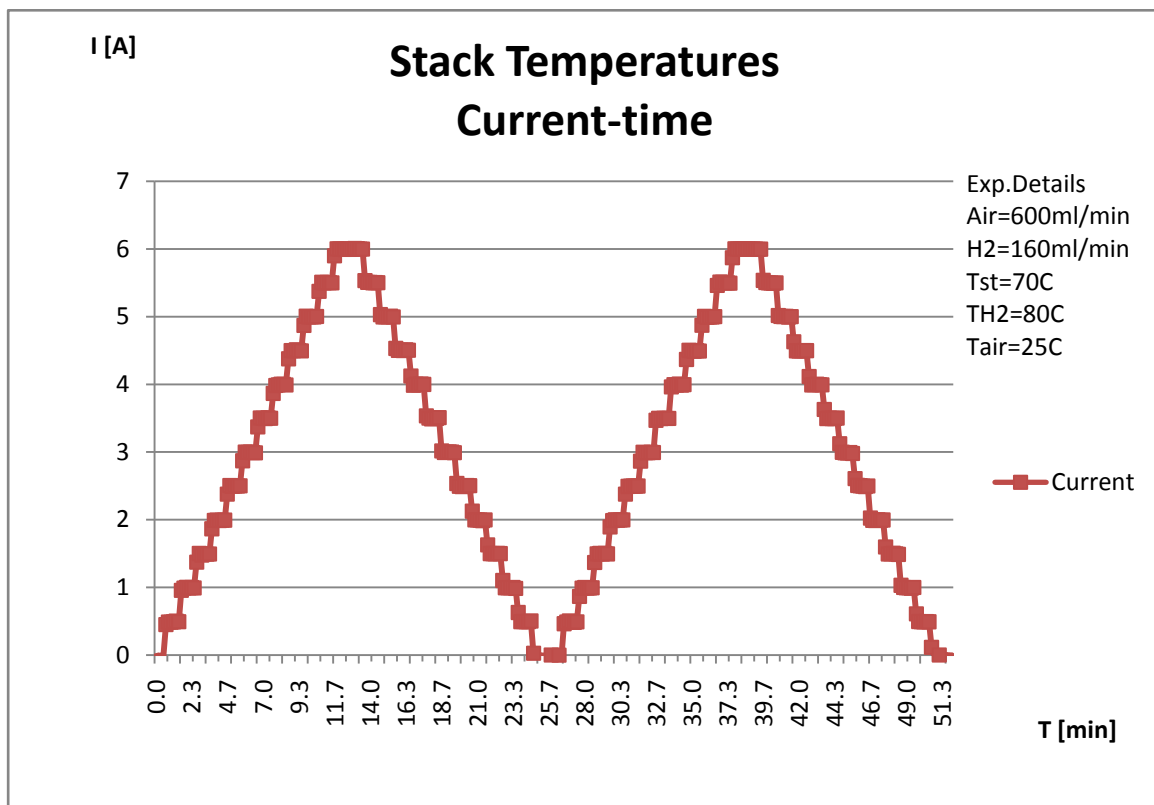
Σχ. 4.40. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=60°C).



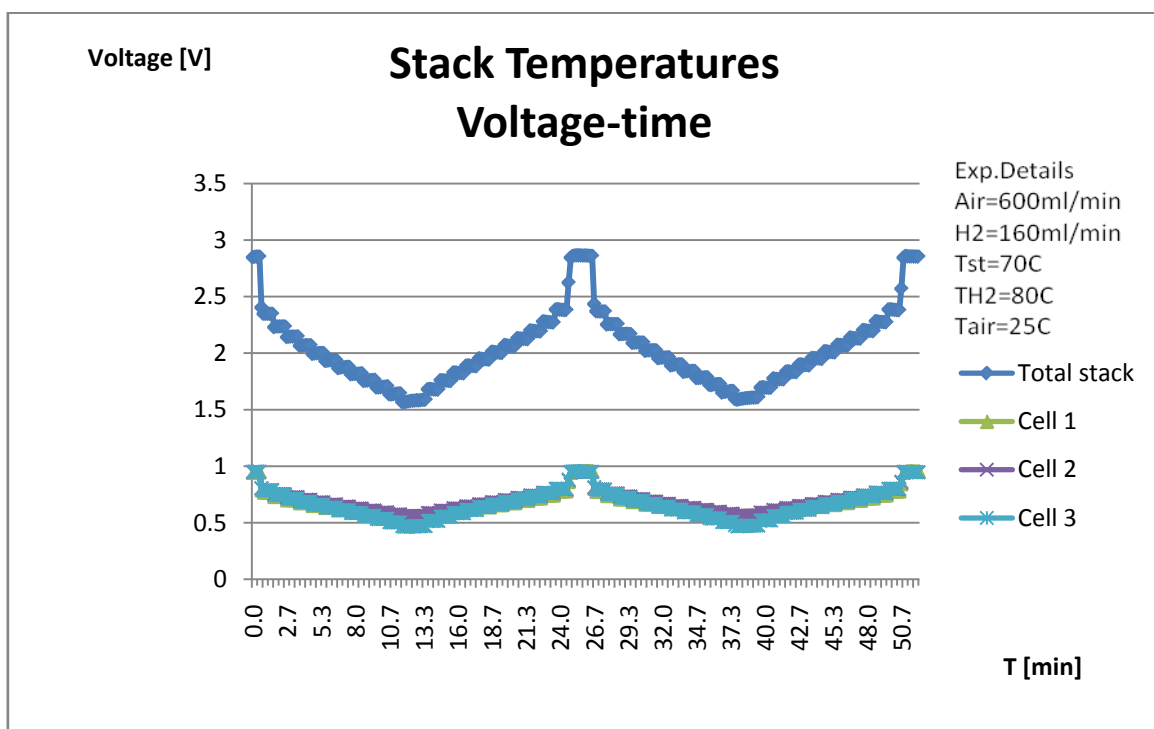
Σχ. 4.41. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=60°C).



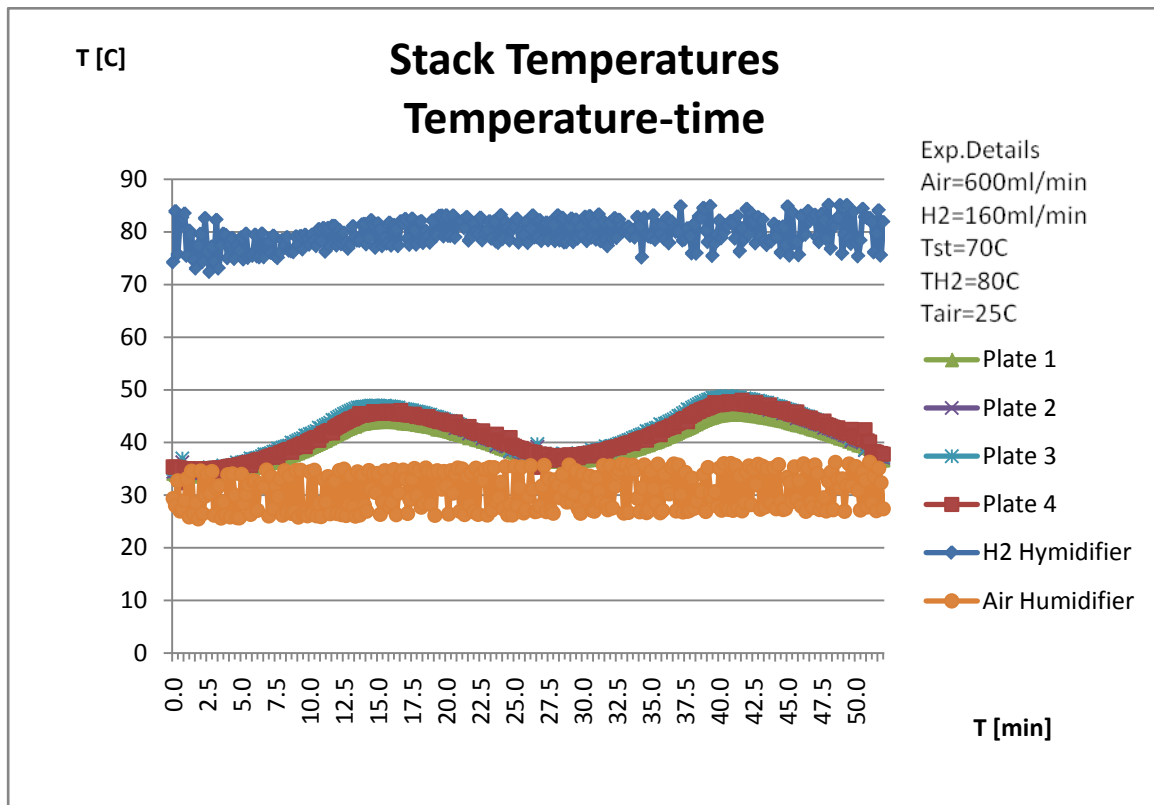
Σχ. 4.42. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=60°C).



Σχ. 4.43. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=70°C).



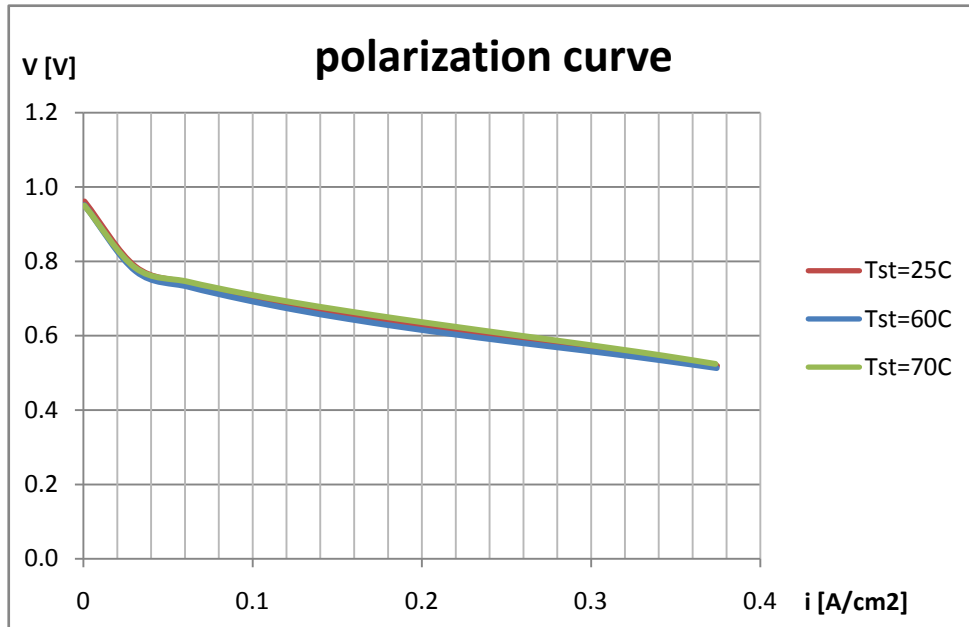
Σχ. 4.44. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=70°C).



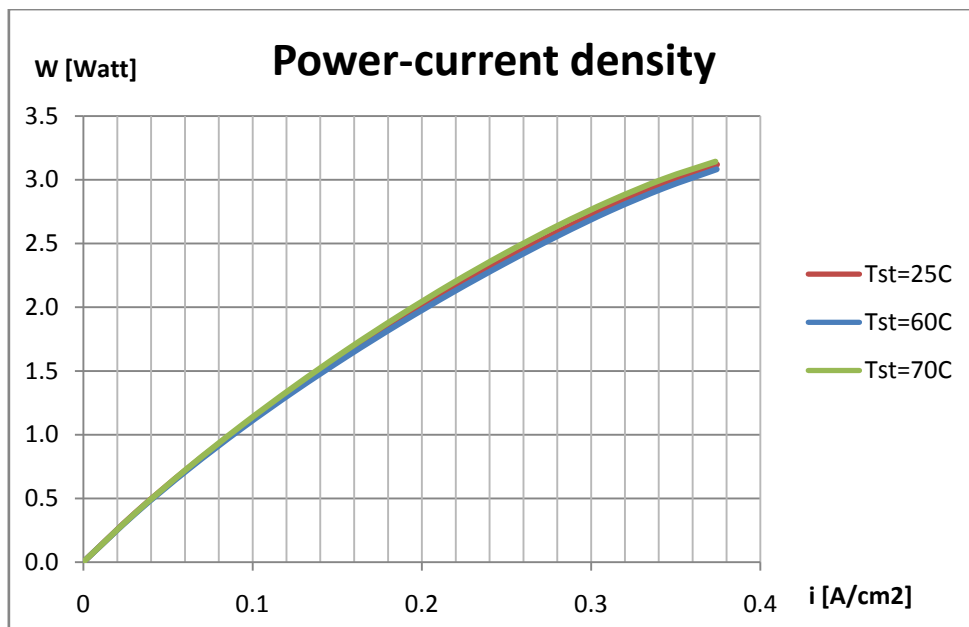
Σχ. 4.45. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tst=70°C).

Παρατηρήσεις – Σχόλια στα διαγράμματα θερμοκρασιών συστοιχίας

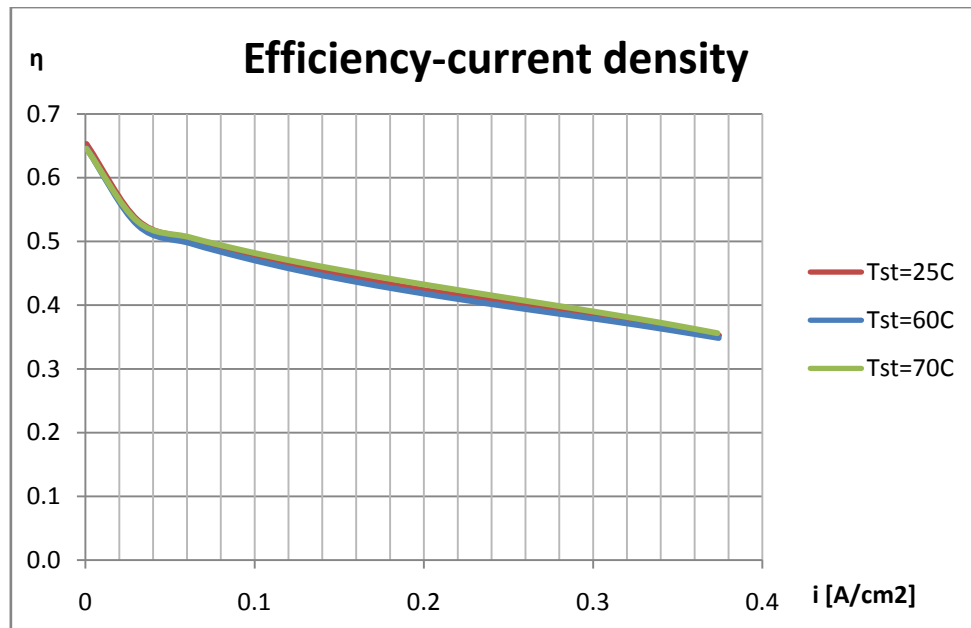
Σχεδιάζουμε τα διαγράμματα $i - V$, $i - P$, $i - \eta$ για τα δεδομένα των πειραμάτων που έχουμε από τα τρία πειράματα θερμοκρασιών συστοιχίας (25°C, 60°C, 70°C) που εκτελέστηκαν παραπάνω.



Σχ. 4.46. Καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος για πειράματα θερμοκρασιών συστοιχίας.



Σχ. 4.47. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για πειράματα θερμοκρασιών συστοιχίας.



Σχ. 4.48. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για πειράματα θερμοκρασιών συστοιχίας.

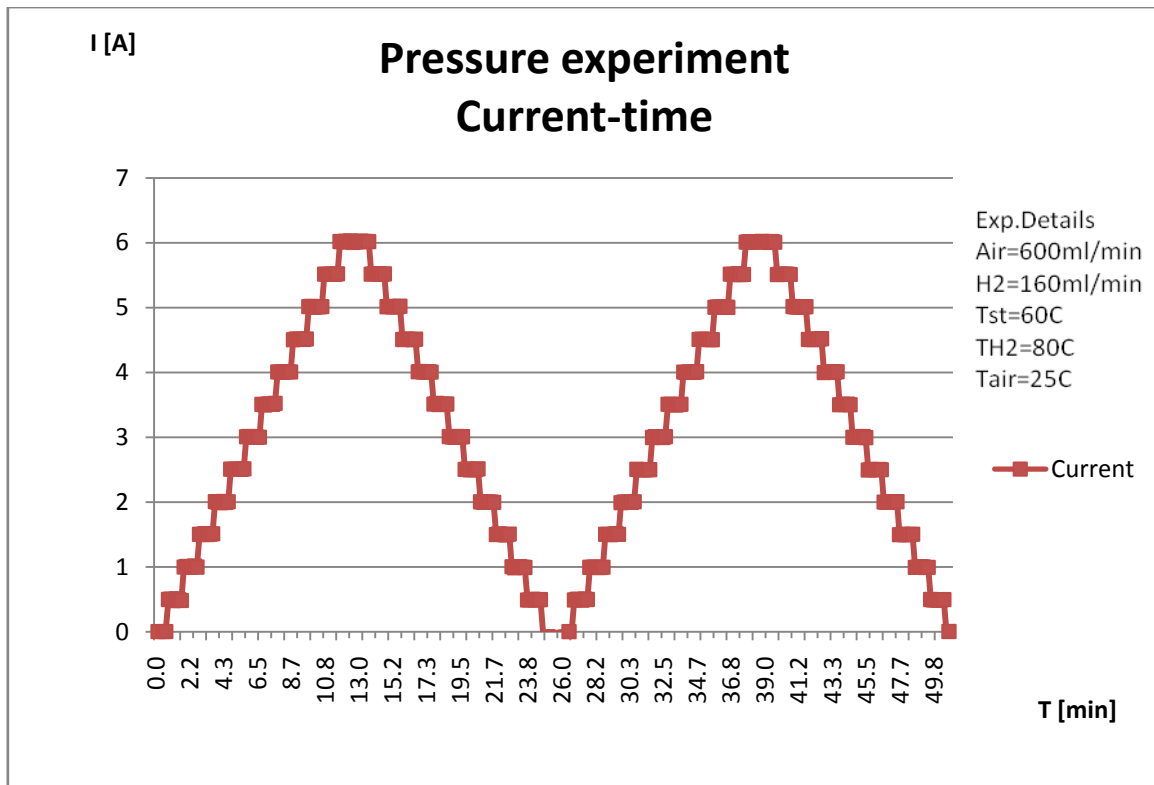
Από τα διαγράμματα των Σχ. 4.46 – 4.48 μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της συστοιχίας κυψελών του δοκιμαστηρίου σε σχέση με την επίδραση που έχει στα διαγράμματα η μεταβολή της θερμοκρασίας της συστοιχίας κυψελών καυσίμου του δοκιμαστηρίου. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να αναδειχτούν παρόλο του ότι τα δεδομένα των διαγραμμάτων δεν εκτείνονται σε όλη την περιοχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Όπως παρατηρούμε τα διαγράμματα έχουν παρόμοια μορφή και ταυτόσημες τιμές άρα συμπεραίνουμε ότι η θερμοκρασία της συστοιχίας έχει μικρή επίδραση στα παρατηρούμενα μεγέθη.

4.4 Πείραμα πιέσεων

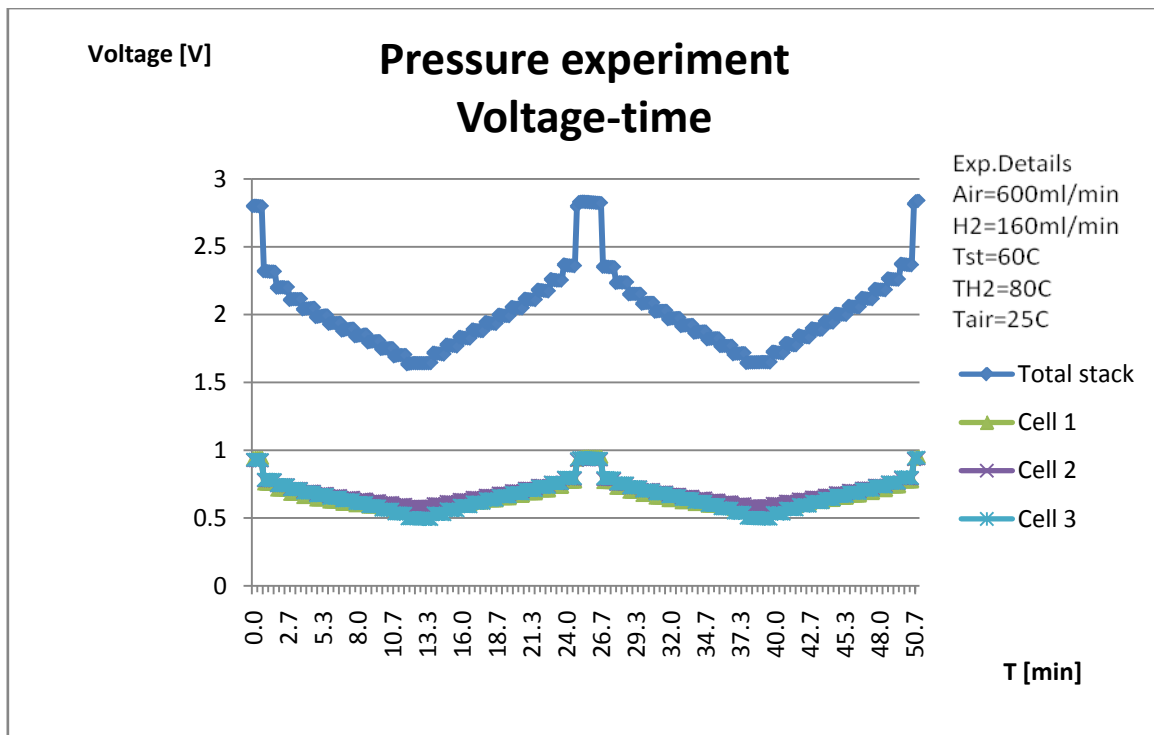
Στο πείραμα αυτό θα εξεταστεί η συμπεριφορά της κυψέλης σε διάφορες πιέσεις των παρεχόμενων αερίων. Αυξάνοντας την πίεση λειτουργίας της κυψέλης βελτιώνεται η απόδοσή της διότι αυξάνεται η συγκέντρωση των αντιδρώντων αερίων. Τα δύο αντιδρώντα αέρια δεν πρέπει να έχουν διαφορετική πίεση, διότι αυτό μπορεί να καταστρέψει ανεπανόρθωτα τη πολυμερική μεμβράνη της κυψέλης η οποία έχει πάχος μόλις 50 μm . Η πίεση ρυθμίζεται από τους ρυθμιστές πίεσης που βρίσκονται στην πειραματική συσκευή. Στο πείραμα αυτό θέτουμε παροχή αέρα 600 ml/min και υδρογόνου 160 ml/min, η θερμοκρασία του εφυγρατηρα υδρογόνου είναι 80°C, του εφυγρατηρα αέρα 25°C (περίπου θερμοκρασία περιβάλλοντος) και η θερμοκρασία της κυψέλης ρυθμίζεται στους 60°C. Με βάση αυτές τις συνθήκες εκτελούνται δύο κλίμακες ρεύματος με μέγιστο ρεύμα 6 A, βήμα 0,5 A και χρονική διάρκεια βήματος 1 min, η δε πίεση των αντιδρώντων αερίων είναι ατμοσφαιρική, 5 psig και 10 psig. Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα των βασικών μεγεθών για τις τρεις περιγραφείσες καταστάσεις.

Πίνακας 4.5. Περιγραφή συνθηκών πειράματος πιέσεων.

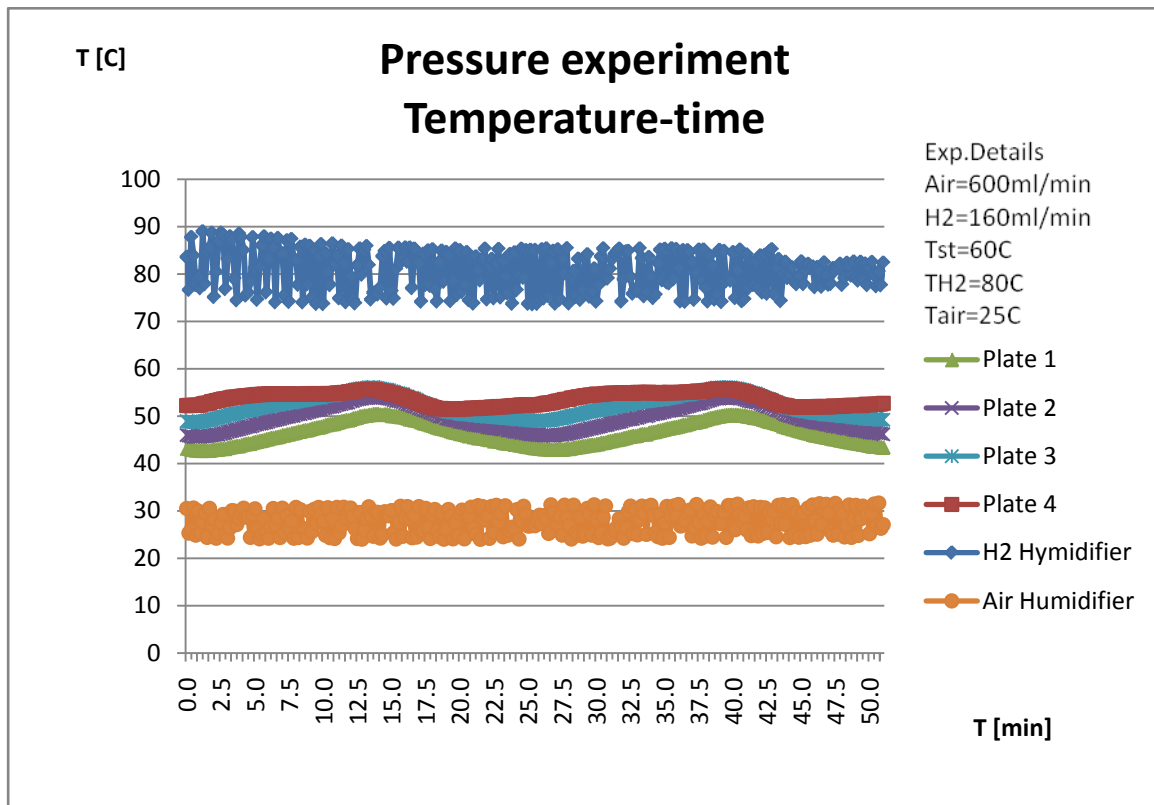
Πείραμα πιέσεων												
	Παροχή H ₂	Παροχή Αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
			Αρχική τιμή ρεύματος	Τελική τιμή ρεύματος	Βήμα			Συστοιχίας Κυψελών	Υγρατηρα H ₂	Υγρατηρα Αέρα	H ₂	Αέρα
	ml/min	ml/min	A	A	A	-	min	°C	°C	°C	psig	psig
1	160	600	0	6	0.5	2	1	60	80	25	1	1
2	160	600	0	6	0.5	2	1	60	80	25	5	5
3	160	600	0	6	0.5	2	1	60	80	25	10	10



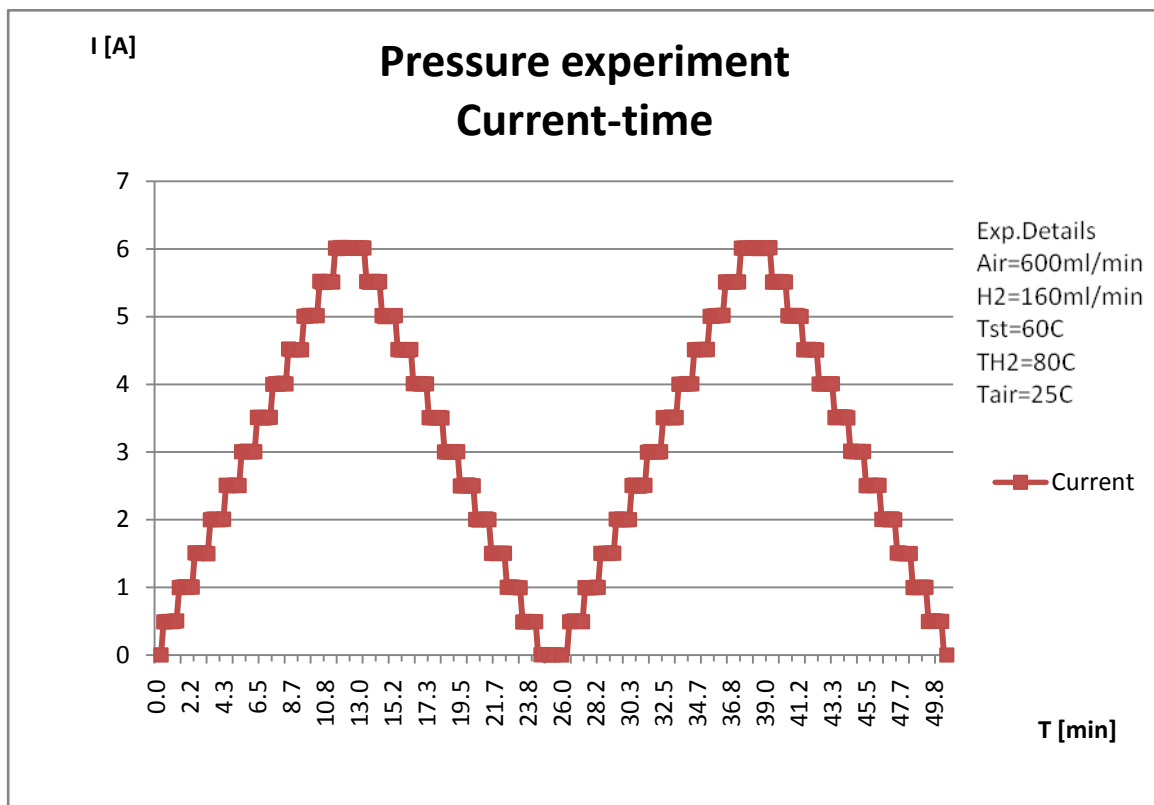
Σχ. 4.49. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=1psig).



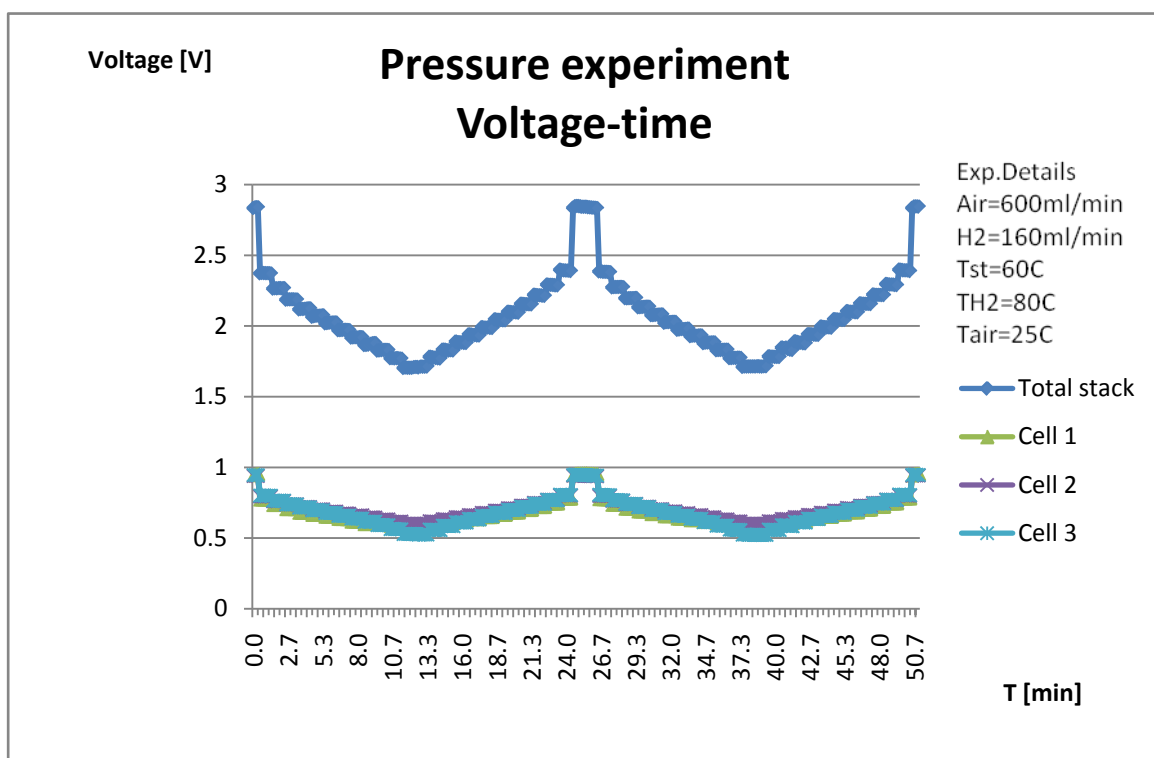
Σχ. 4.50. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=1psig).



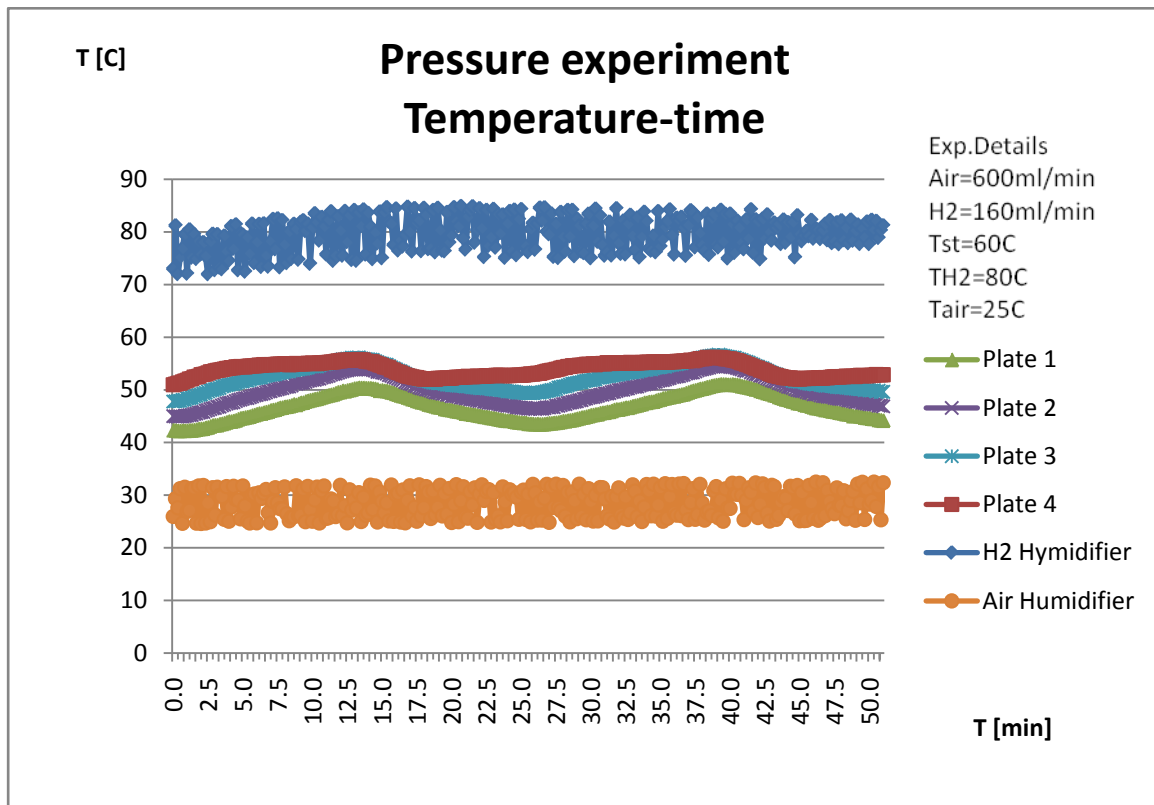
Σχ. 4.51. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=1psig).



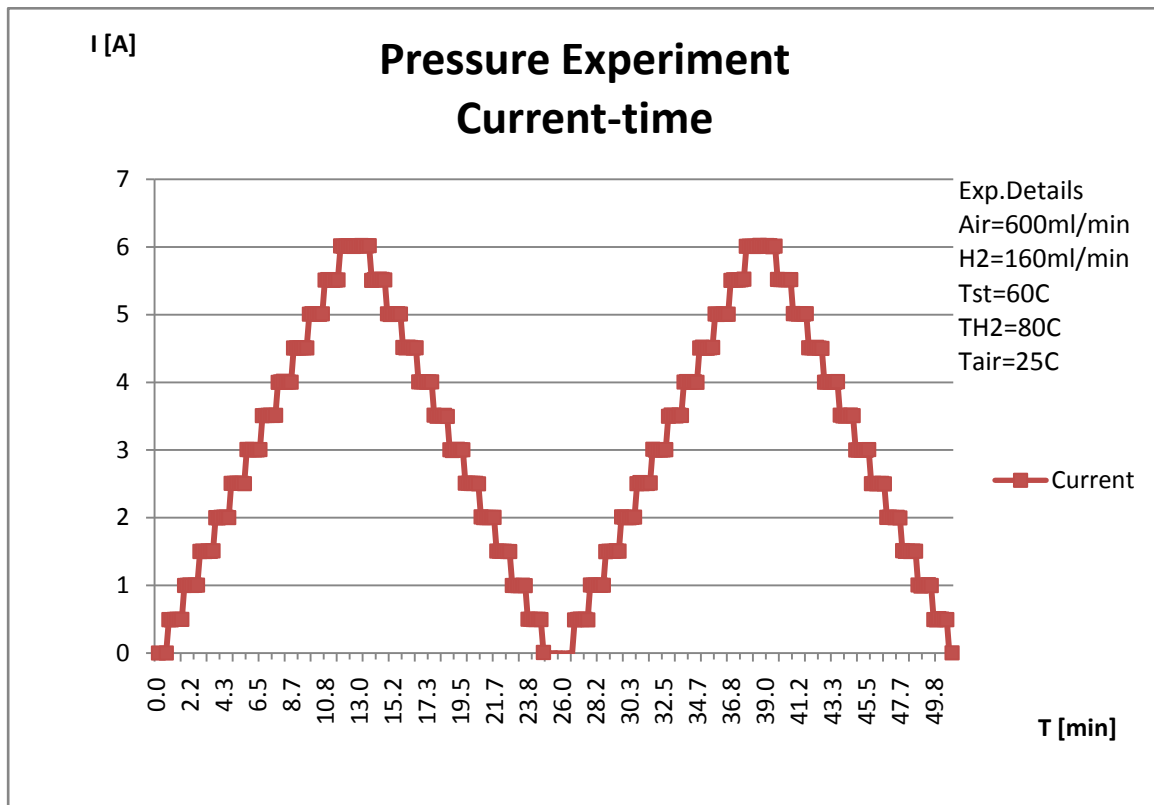
Σχ. 4.52. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=5 psig).



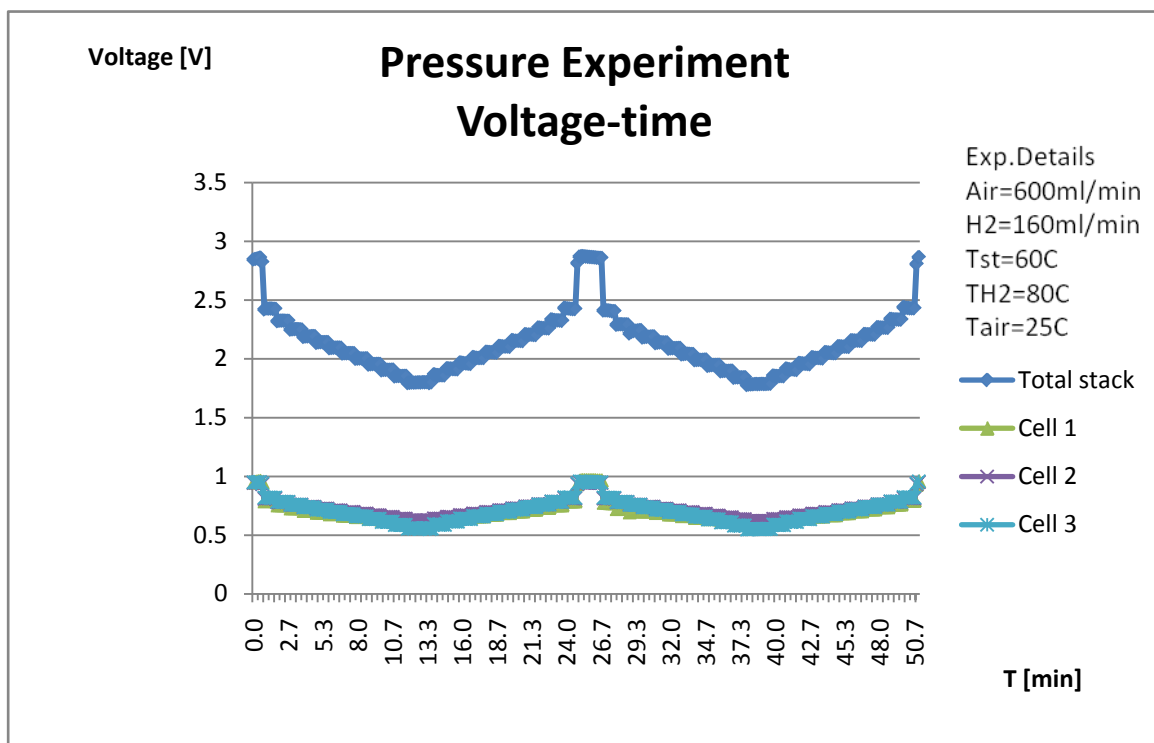
Σχ. 4.53. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=5 psig).



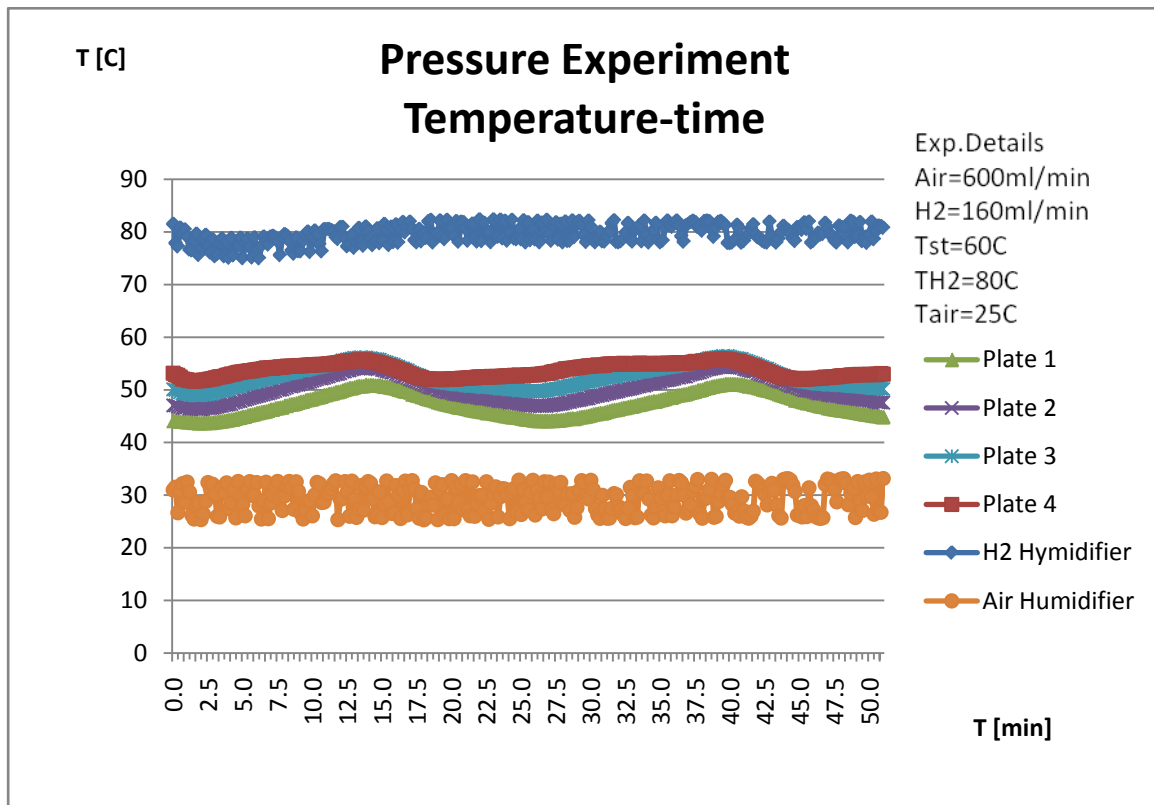
Σχ. 4.54. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=5 psig).



Σχ. 4.55. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=10 psig).



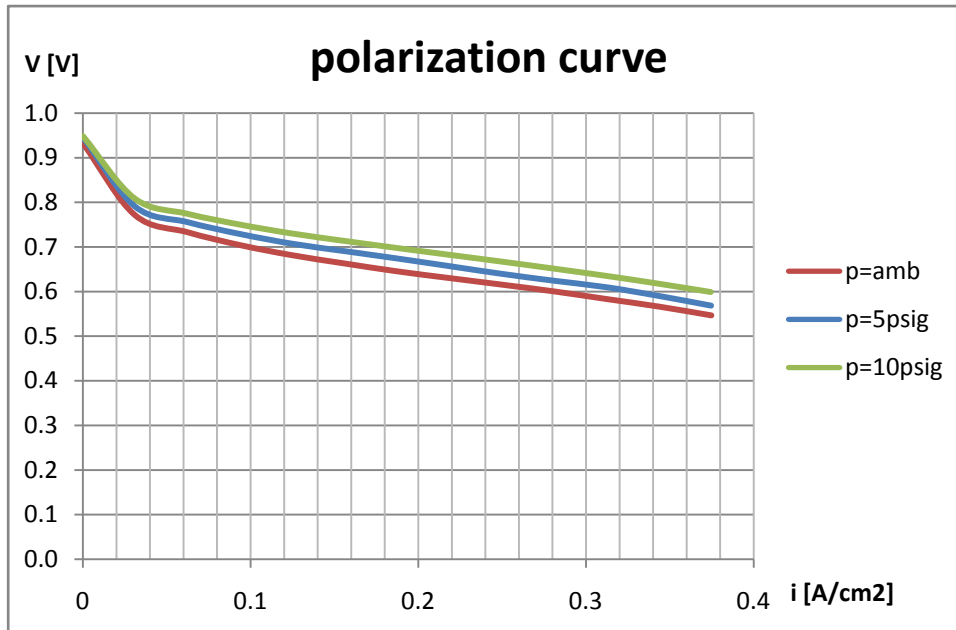
Σχ. 4.56. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=10 psig).



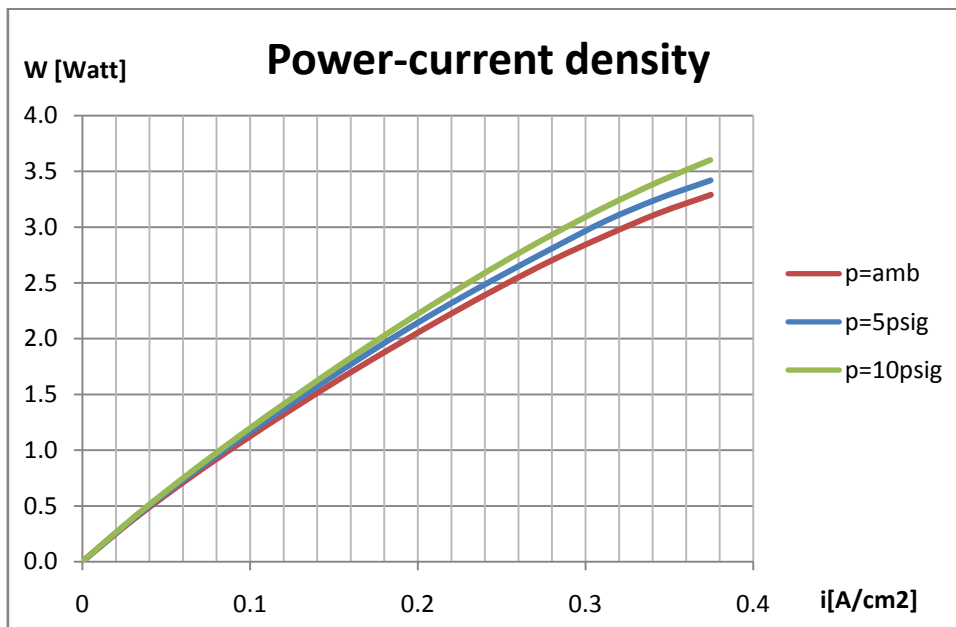
Σχ. 4.57. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml,P=10 psig).

Παρατηρήσεις – Σχόλια στα διαγράμματα πιέσεων συστοιχίας

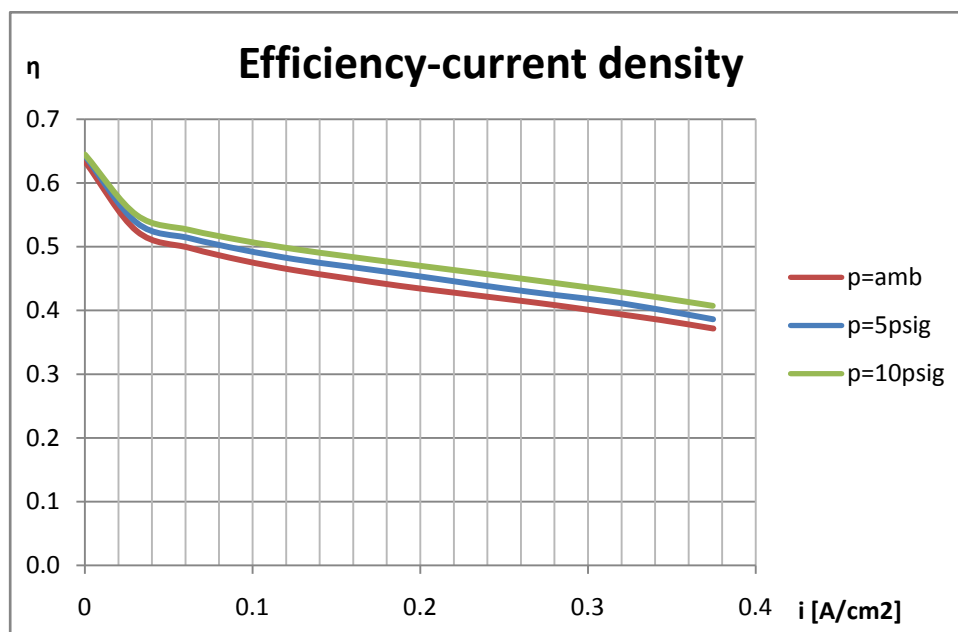
Σχεδιάζουμε τα διαγράμματα $i - V$, $i - P$, $i - \eta$ για τα δεδομένα των πειραμάτων που έχουμε από τα τρία πειράματα πιέσεων συστοιχίας (1psig, 5 psig, 10 psig) που εκτελέστηκαν παραπάνω.



Σχ. 4.58. Καμπύλη polarization για πειράματα πιέσεων συστοιχίας.



Σχ. 4.59. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για πειράματα πιέσεων συστοιχίας.



Σχ. 4.60. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για πειράματα πιέσεων συστοιχίας.

Από τα διαγράμματα των Σχ. 4.58 – 4.60 μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την συμπεριφορά της συστοιχίας κυψελών του δοκιμαστηρίου σε σχέση με την επίδραση που έχει στα διαγράμματα η μεταβολή της πίεσης της συστοιχίας κυψελών καυσίμου του δοκιμαστηρίου. Ίσως τα συμπεράσματα αυτά να ήταν πιο ολοκληρωμένα αν η περιοχή μελέτης μας ήταν όλη η περιοχή λειτουργίας της κυψέλης, κάτι το οποίο δεν κατέστη δυνατό λόγω τεχνικών προβλημάτων.

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε τα διαγράμματα έχουν παρόμοια μορφή αλλά παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε την πίεση τόσο αυξάνονται κατά ένα ποσοστό οι τιμές των διαγραμμάτων. Μετά από υπολογισμούς σε σχέση με τις τιμές της τάσης, ισχύος και βαθμού απόδοσης του 1 psig, παρατηρούμε ότι οι μεταβολές στα μελετώμενα μεγέθη είναι αυτές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6. Σύγκριση τιμών πίεσης σε σχέση με την μέγιστη πίεση (p=1 psig)

i	p=1 psig			p=5 psig			p=10 psig		
	V	P	η	ΔV	ΔP	$\Delta \eta$	ΔV	ΔP	$\Delta \eta$
A/cm ²	V	Watt	-	V	Watt	-	V	Watt	-
0.2	0.630	2.214	0.428	4.22%	4.15%	4.22%	8.26%	8.29%	8.26%
0.3	0.584	2.926	0.396	4.49%	4.52%	4.49%	8.90%	8.83%	8.90%

4.5 Πείραμα θερμοκρασιών ανόδου-καθόδου

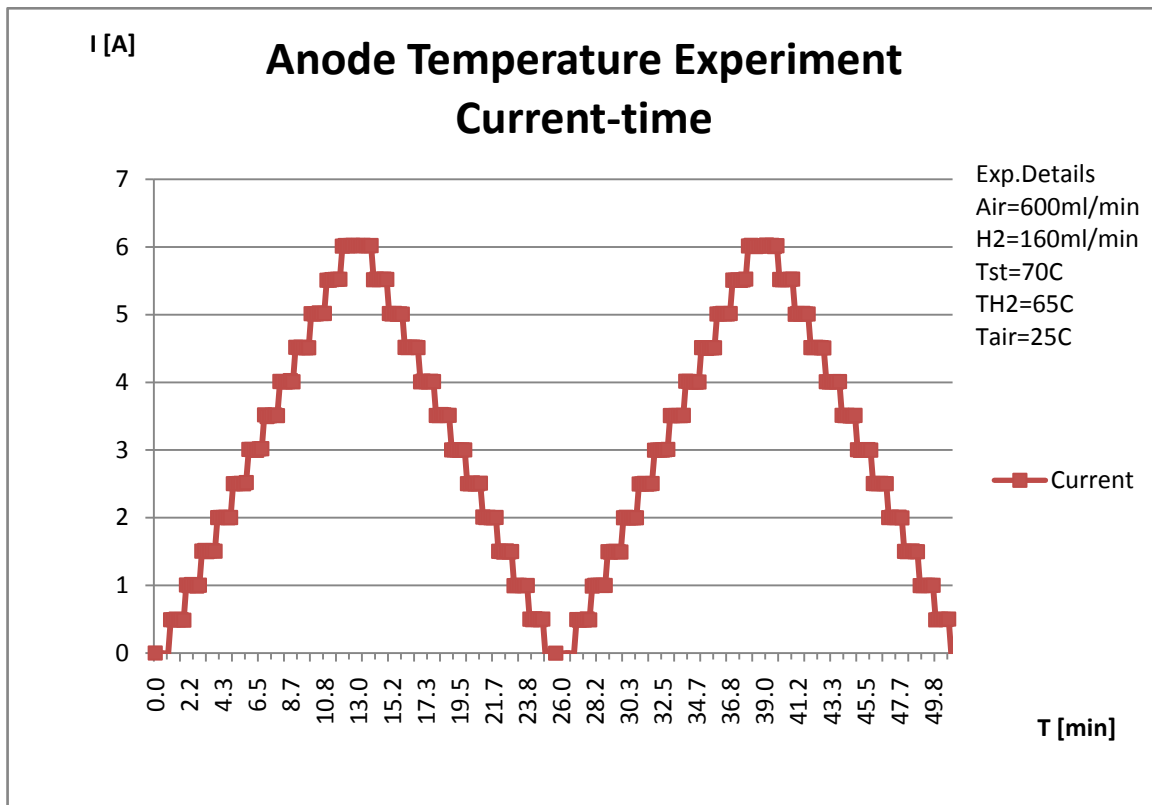
Στο πείραμα αυτό εξετάζεται η συμπεριφορά της κυψέλης για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας του εφυγρανήρα της ανόδου και της καθόδου, δηλαδή διαφορετικές τιμές θερμοκρασιών των εναλλακτών που βρίσκονται τοποθετημένοι στα δοχεία εφύγρυνσης του αέρα και του υδρογόνου. Η εφύγρυνση είναι μια διαδικασία η οποία επιτυγχάνεται με τη δίοδο των αντιδρώντων αερίων μέσω δοχείων με αποσταγμένο νερό πριν διοχετευτούν στην κυψέλη. Το νερό θερμαίνεται με ηλεκτρική αντίσταση σε μορφή μεμβράνης, η οποία περιβάλλει το δοχείο αποσταγμένου νερού. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία της κυψέλης και τη αποτελεσματική διενέργεια των αντιδράσεων.

Πείραμα θερμοκρασίας ανόδου

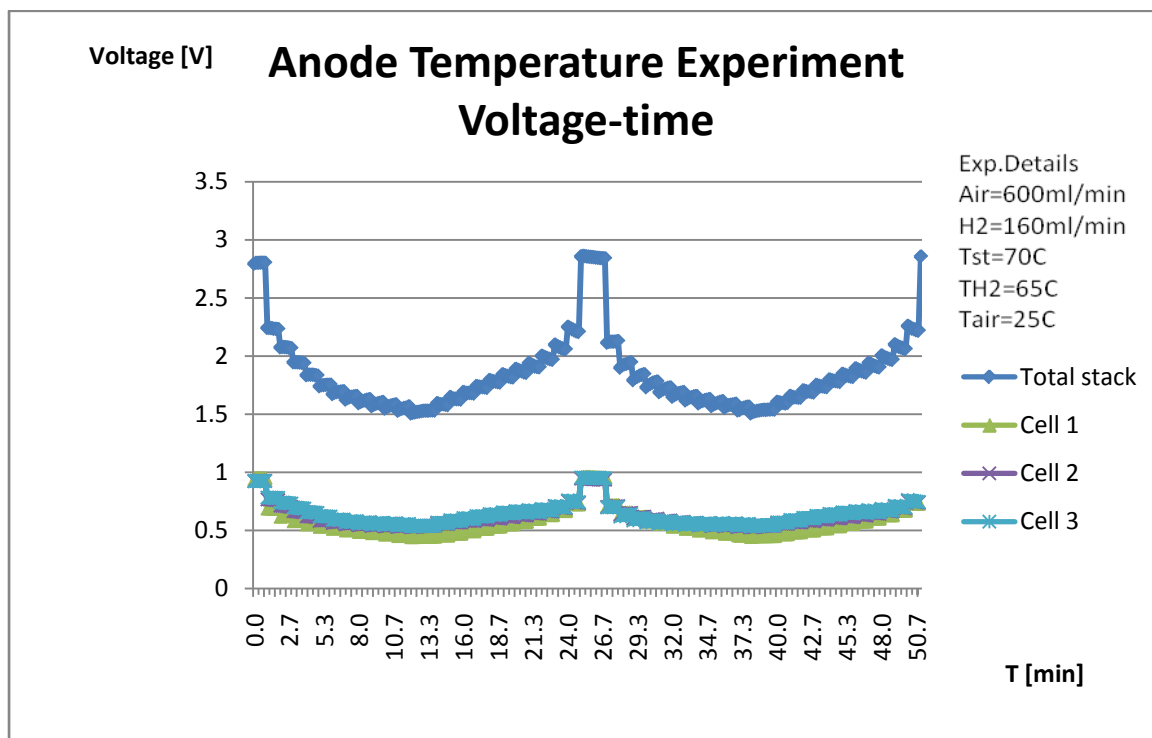
Στο πείραμα αυτό η παροχή είναι 160 ml/min για τον αέρα και 600 ml/min για το υδρογόνο. Εκτελούνται 2 κλιμακωτές σκάλες με μέγιστο ρεύμα 6 A, με βήμα 0,5 A και χρονική διάρκεια βήματος 1 min. Ο εφυγρανήρας αέρα ρυθμίζεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C), η συστοιχία κυψελών σε θερμοκρασία 70°C ενώ ο εφυγρανήρας υδρογόνου παίρνει διαδοχικά τις θερμοκρασίες 50°C, 65°C, 80°C.

Πίνακας 4.7. Περιγραφή συνθηκών πειράματος θερμοκρασίας εφυγρανήρα ανόδου.

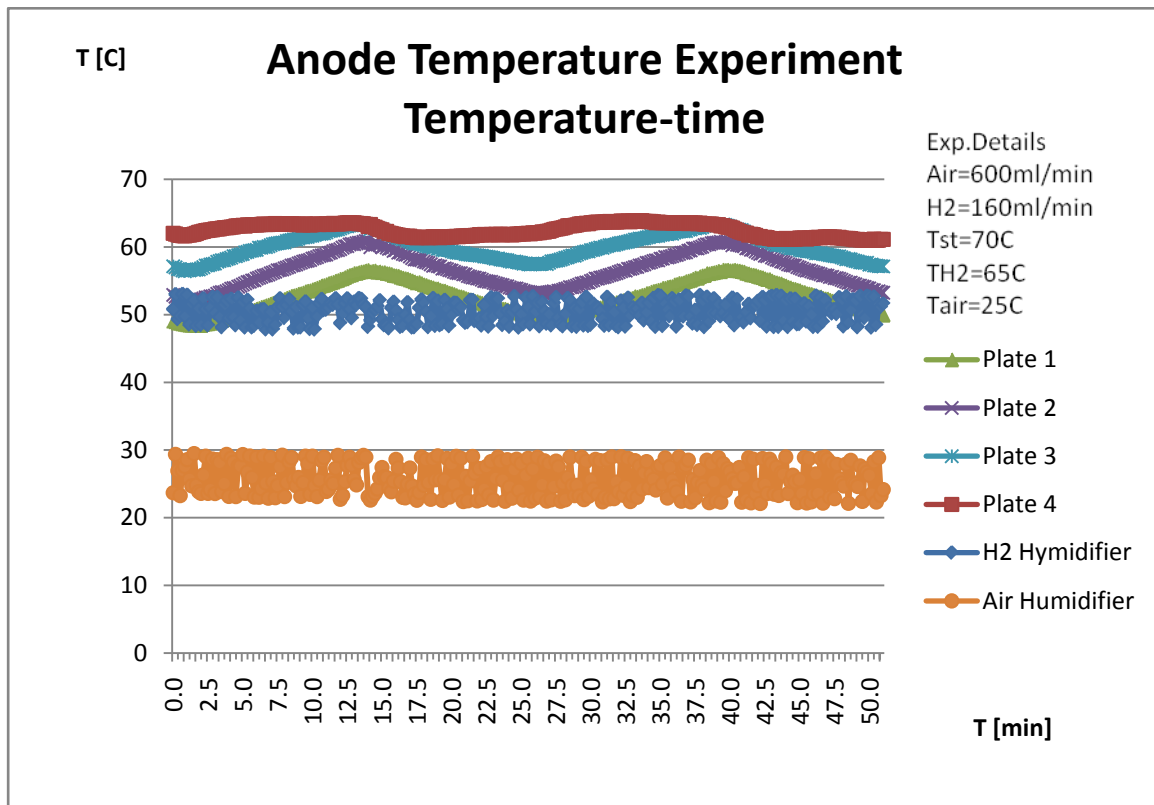
Πείραμα θερμοκρασίας εφυγρανήρα ανόδου												
	Παροχή H ₂	Παροχή Αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
			Αρχική τιμή ρεύματος	Τελική τιμή ρεύματος	Βήμα			Συστοιχίας Κυψελών	Υγρανήρα H ₂	Υγρανήρα Αέρα	H ₂	Αέρα
	ml/min	ml/min	A	A	A	-	min	°C	°C	°C	psig	psig
1	160	600	0	6	0.5	2	1	70	50	25	0	0
2	160	600	0	6	0.5	2	1	70	65	25	0	0
3	160	600	0	6	0.5	2	1	70	80	25	0	0



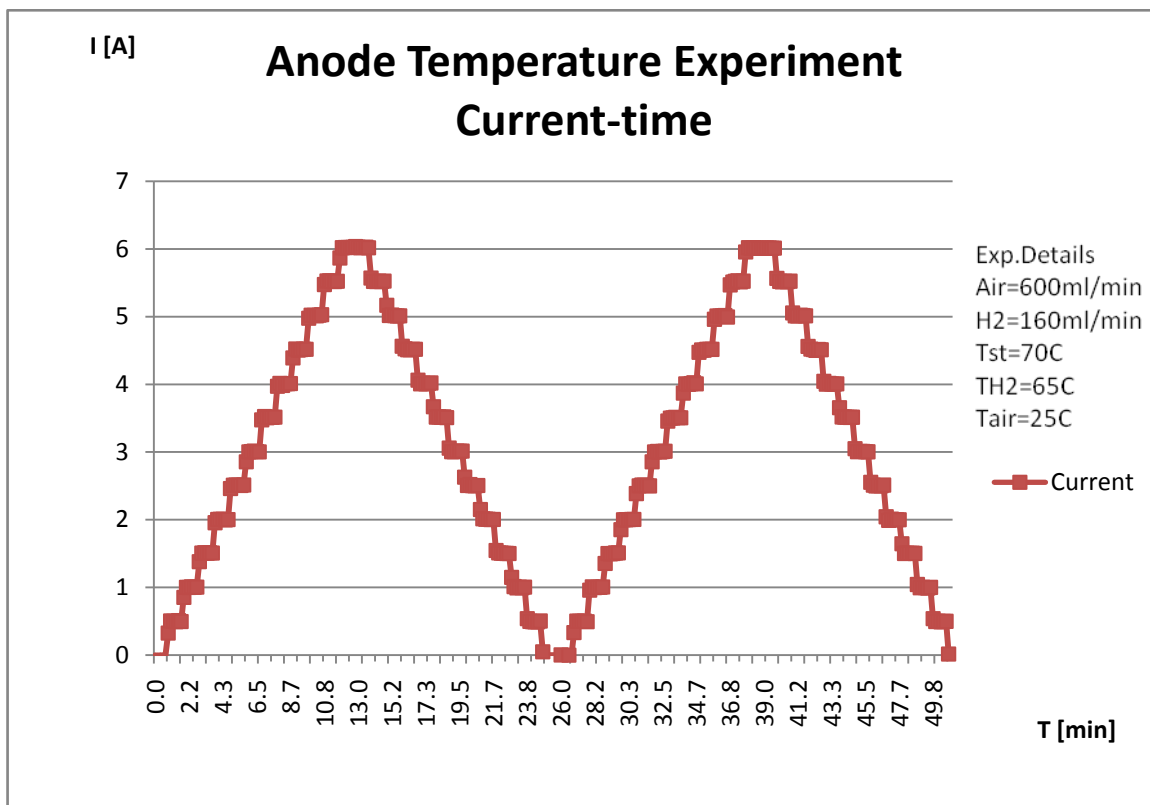
Σχ. 4.61. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tanode=50°C)-πείραμα ανόδου.



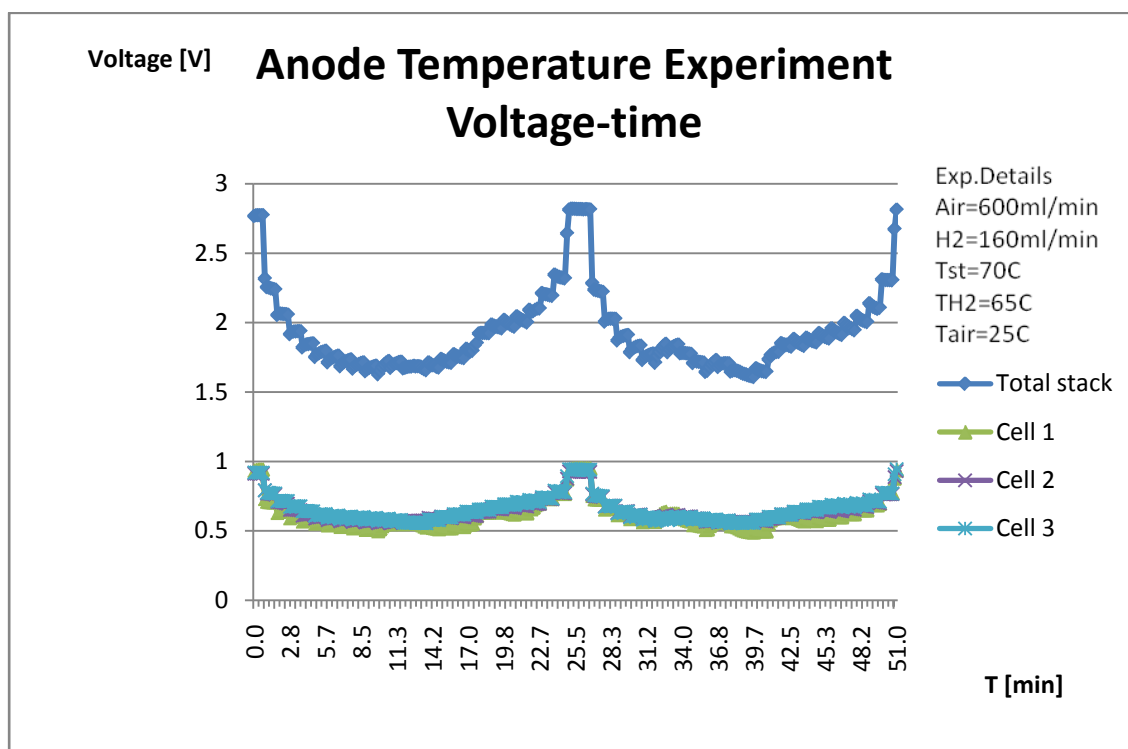
Σχ. 4.62. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tanode=50°C) -πείραμα ανόδου.



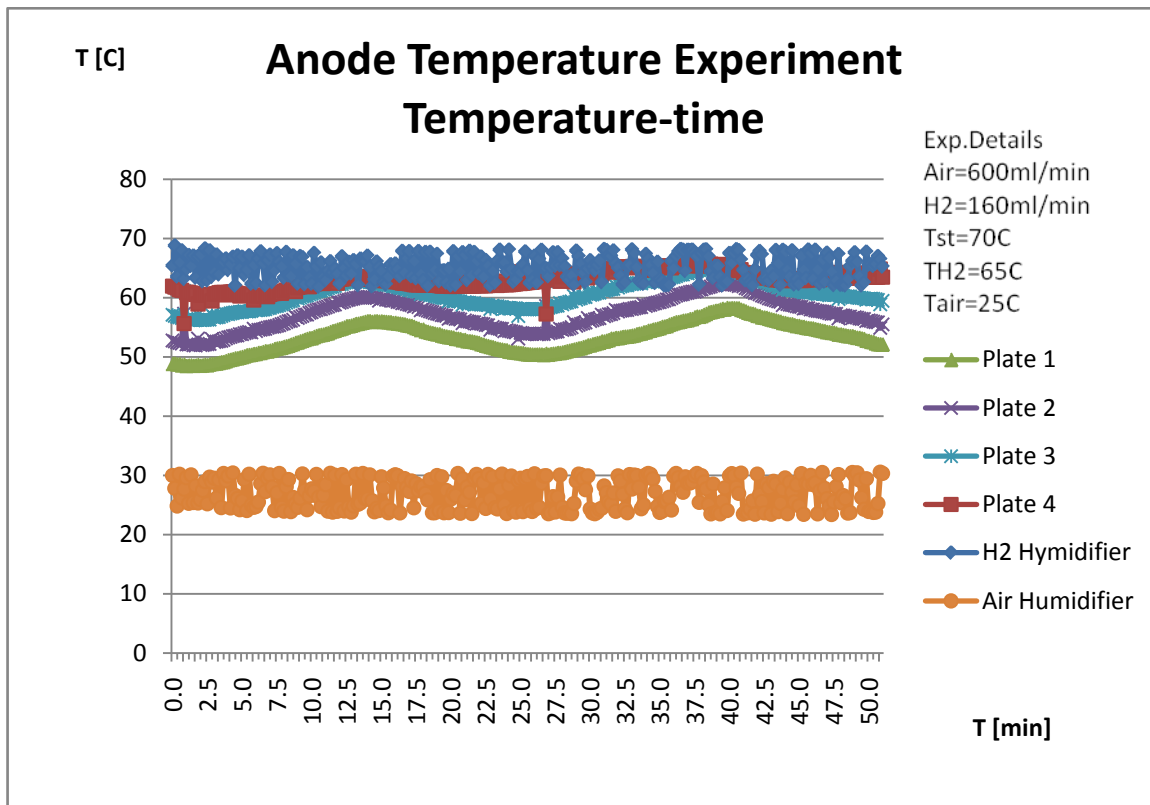
Σχ. 4.63. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tanode=50°C) -πείραμα ανόδου.



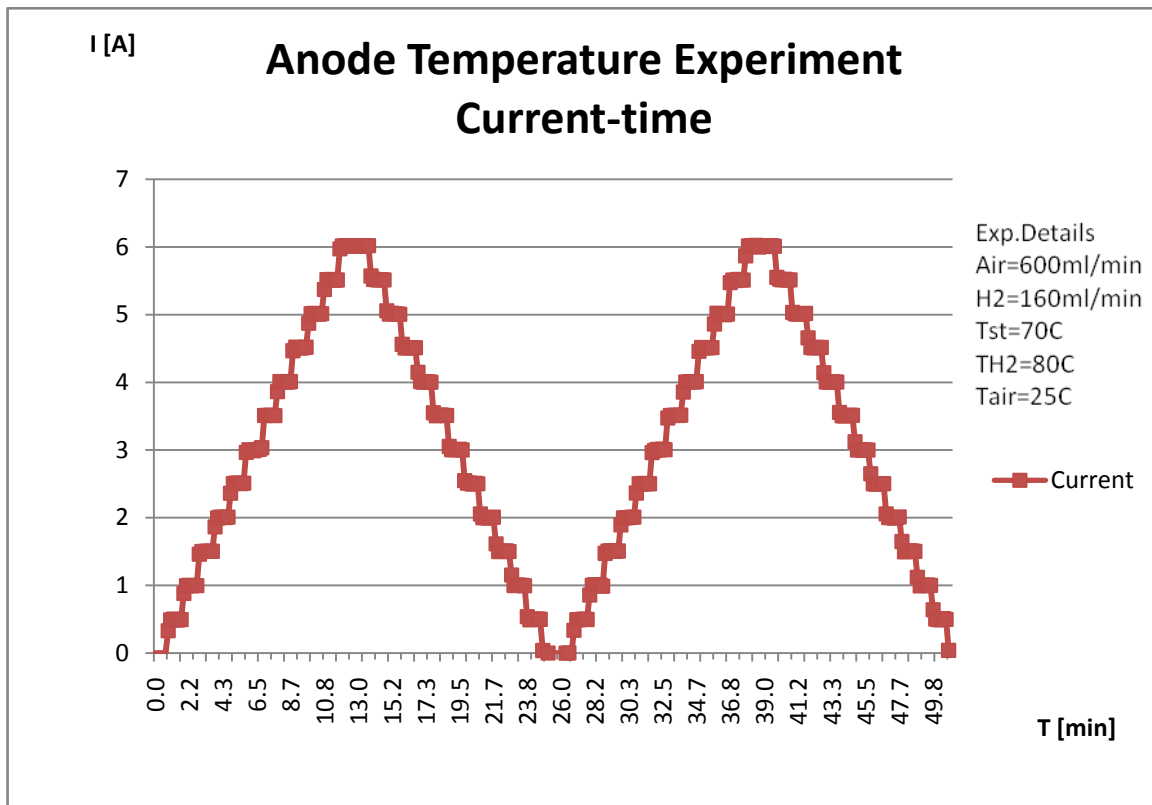
Σχ. 4.64. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, T_{anode}=65°C) -πείραμα ανόδου.



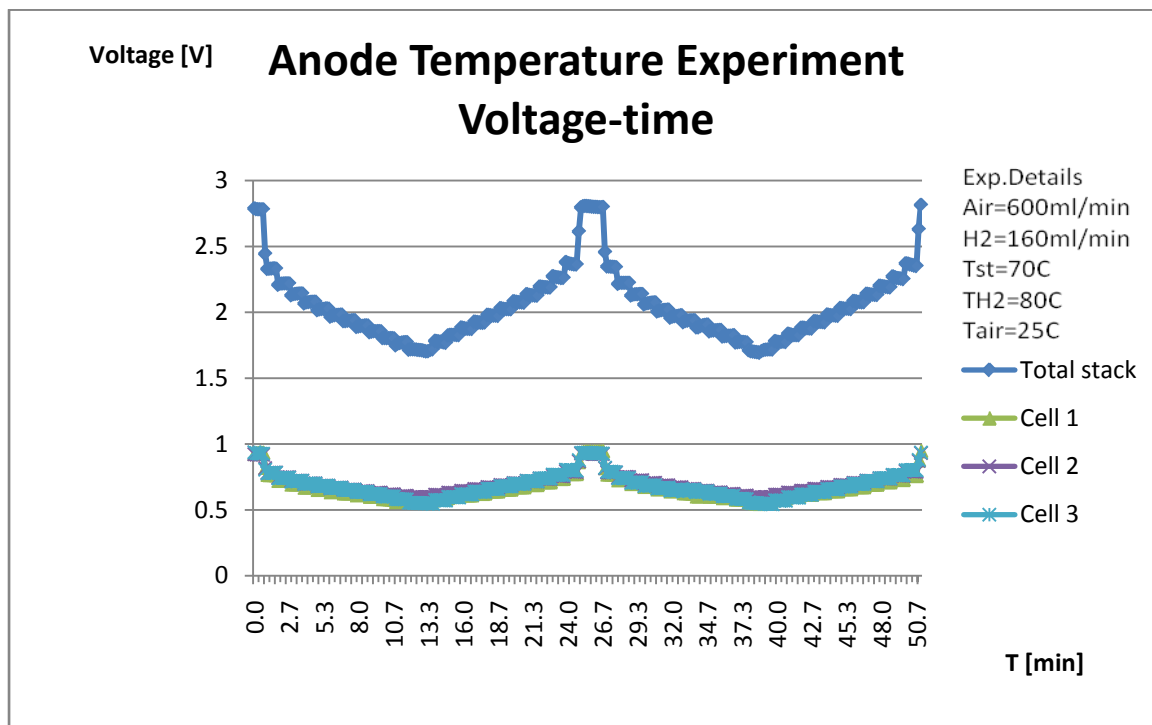
Σχ. 4.65. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, T_{anode}=65°C) -πείραμα ανόδου.



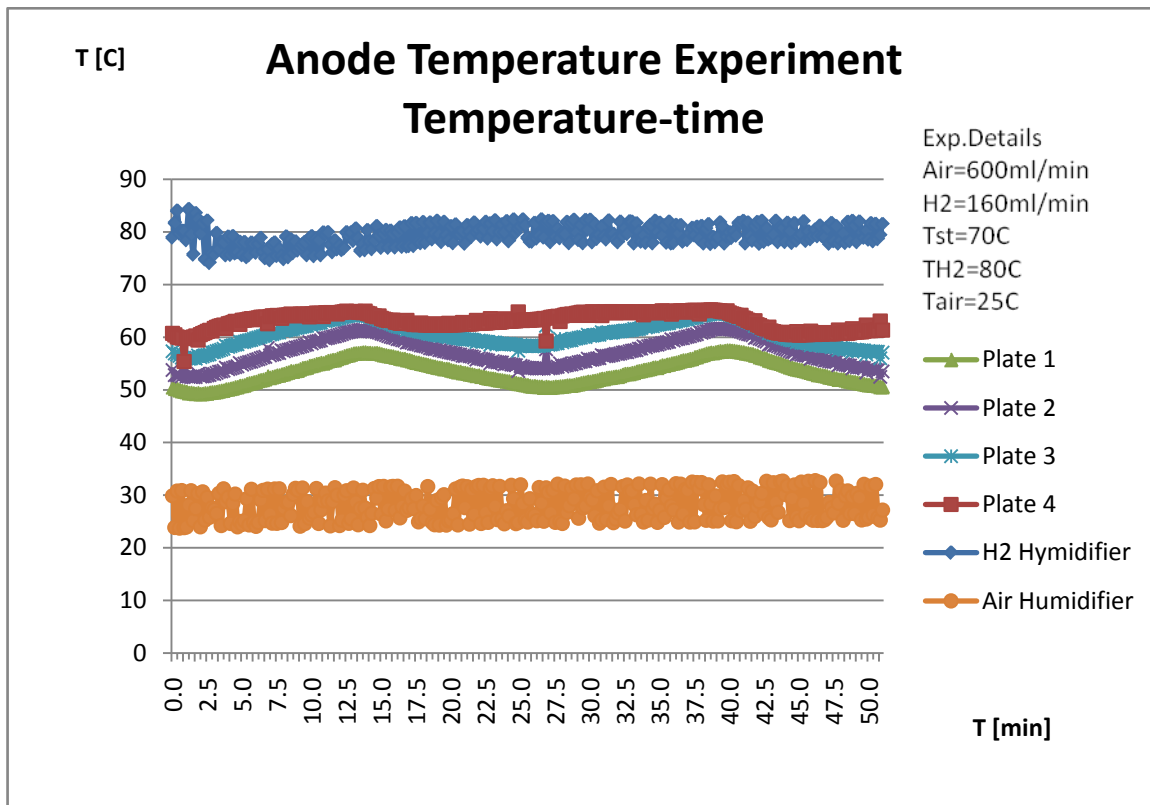
Σχ. 4.66. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, T_{anode}=65°C) -πείραμα ανόδου.



Σχ. 4.67. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H₂=160 ml, Air=600 ml, T_{anode}=80°C) -πείραμα ανόδου.



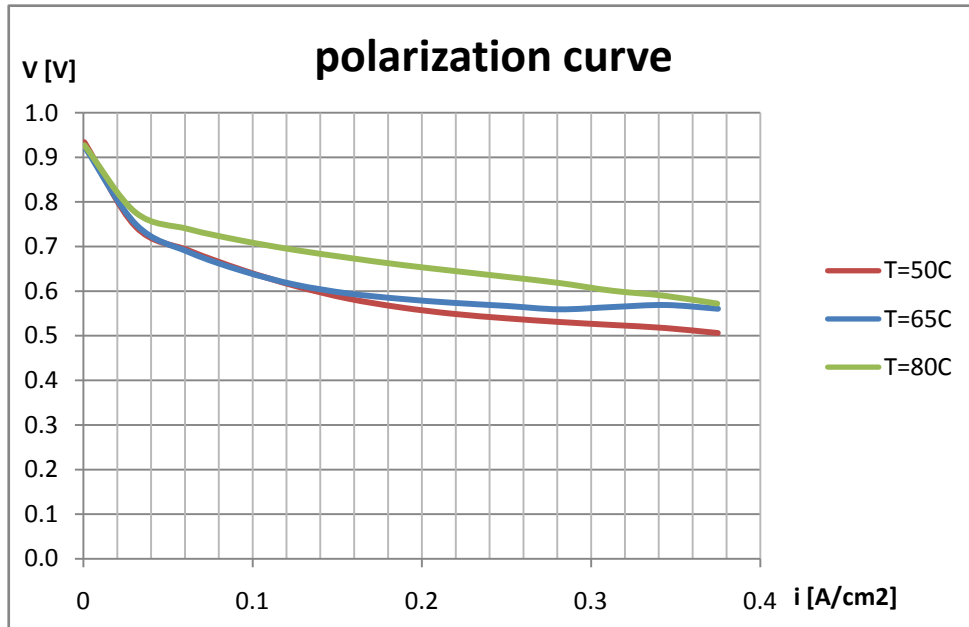
Σχ. 4.68. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H₂=160 ml, Air=600 ml, T_{anode}=80°C) -πείραμα ανόδου.



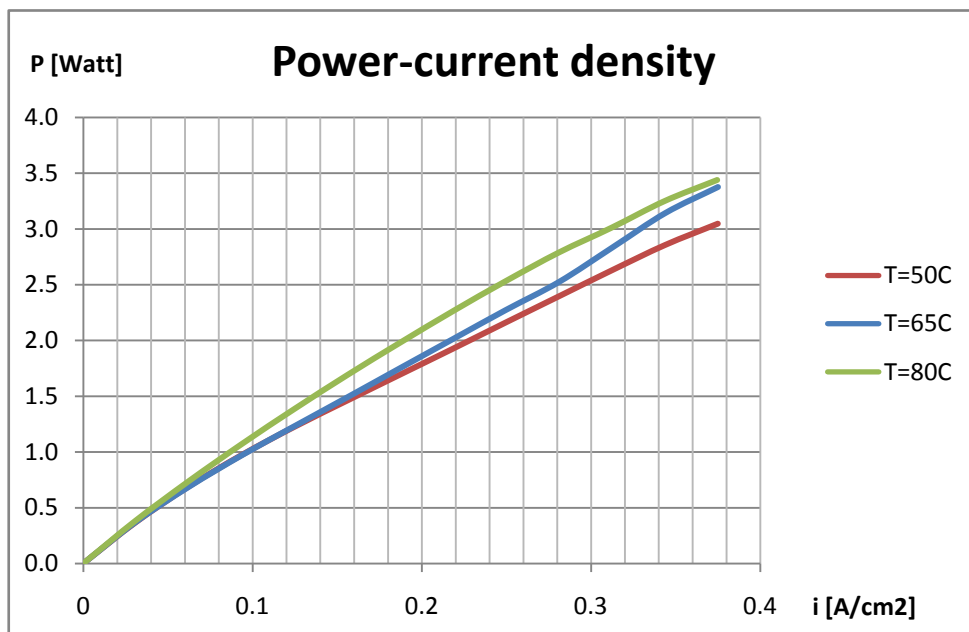
Σχ. 4.69. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου(H₂=160 ml, Air=600 ml, T_{anode}=80°C) -πείραμα ανόδου.

Παρατηρήσεις – Σχόλια στα διαγράμματα θερμοκρασιών ανόδου

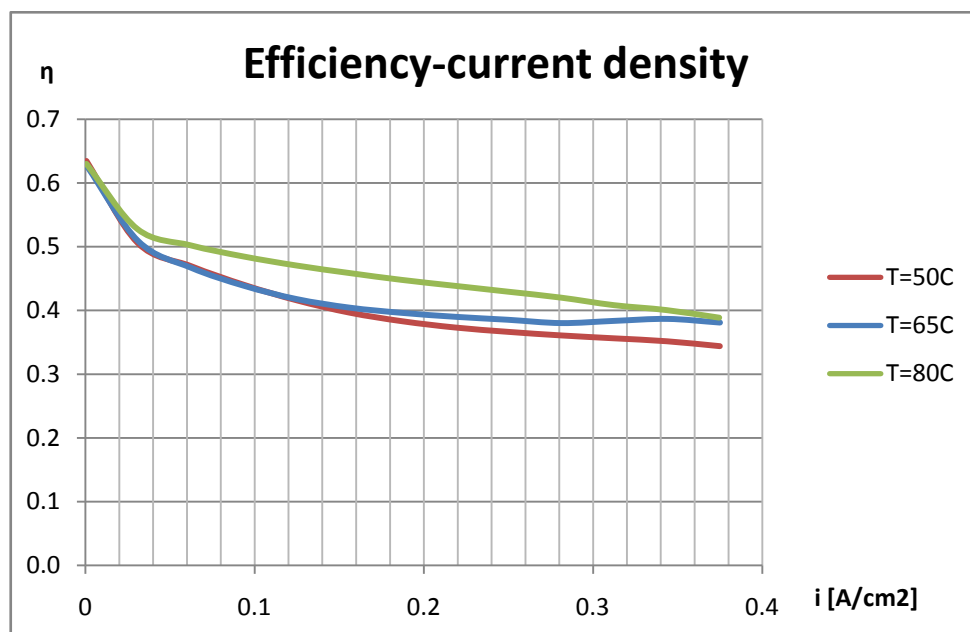
Σχεδιάζουμε τα διαγράμματα i - V , i - P , i - η για τα δεδομένα των πειραμάτων που έχουμε από τα τρία πειράματα θερμοκρασιών ανόδου (50°C , 65°C , 80°C) που εκτελέστηκαν παραπάνω.



Σχ. 4.70. Καμπύλη polarization για πειράματα θερμοκρασιών ανόδου.



Σχ. 4.71. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για πειράματα θερμοκρασιών ανόδου.



Σχ. 4.72. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για πειράματα θερμοκρασιών ανόδου.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συσχετίσουμε την συμπεριφορά της συστοιχίας κυψελών του δοκιμαστηρίου με την επίδραση που έχει στα διαγράμματα η μεταβολή της θερμοκρασίας ανόδου των κυψελών καυσίμου του δοκιμαστηρίου. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να αναδειχτούν παρόλο του ότι τα δεδομένα των διαγραμμάτων δεν εκτείνονται σε όλη την περιοχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Παρατηρούμε ποιοτικά από τα παραπάνω διαγράμματα ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας της ανόδου αυξάνονται τα μελετώμενα μεγέθη. Παρόλα αυτά οι καμπύλες των Σχ.4.70 – 4.72 παρουσιάζουν περιοχές οι οποίες δεν μπορούν να εξηγηθούν σαφώς.

Πίνακας 4.8. Συγκριτικά στοιχεία θερμοκρασιών T=50°C, T=65°C, T=80°C.

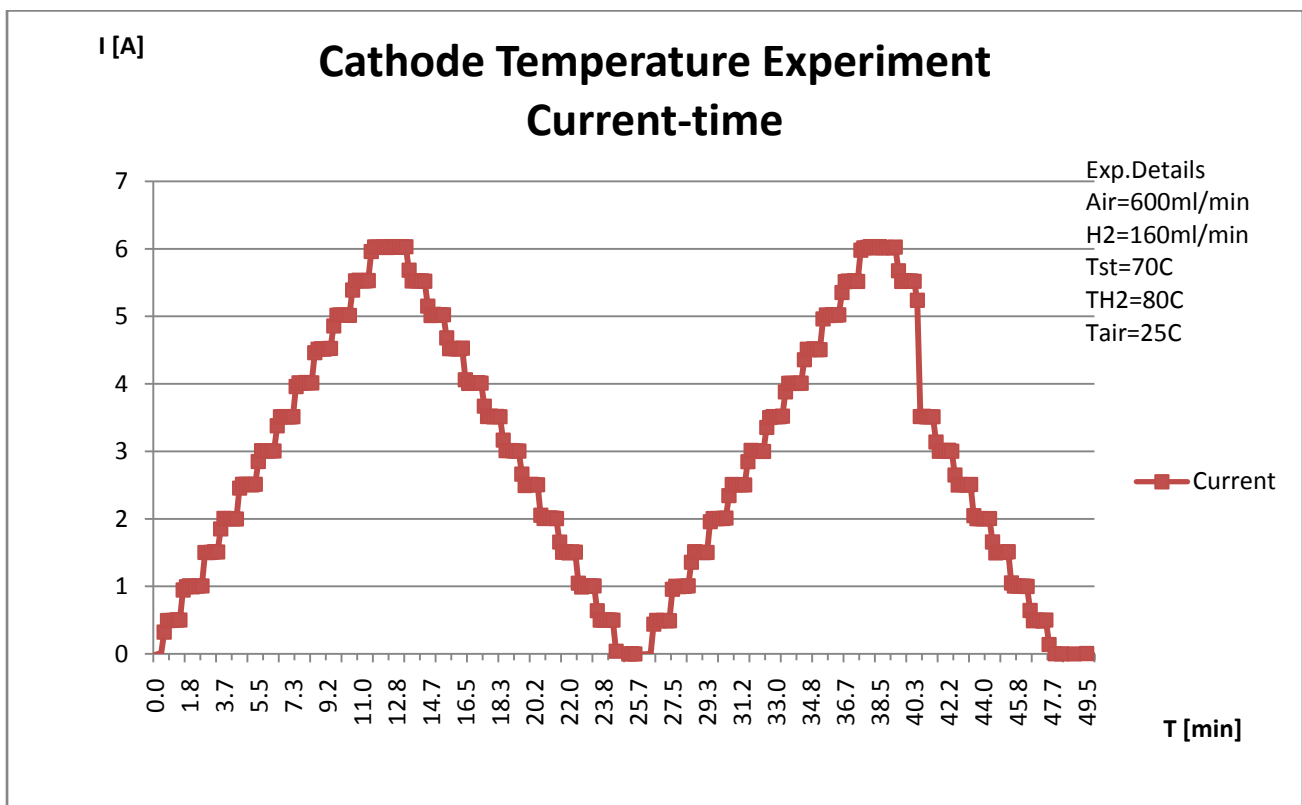
i	T=50°C			T=65°C			T=80°C		
	V	P	η	V	P	η	V	P	η
A/cm ²	V	Watt	-	V	Watt	-	V	Watt	-
0.22	0.549	1.927	0.373	0.574	2.017	0.390	0.645	2.266	0.439
0.31	0.524	2.630	0.356	0.565	2.834	0.384	0.601	3.013	0.408

4.6 Πείραμα θερμοκρασίας καθόδου

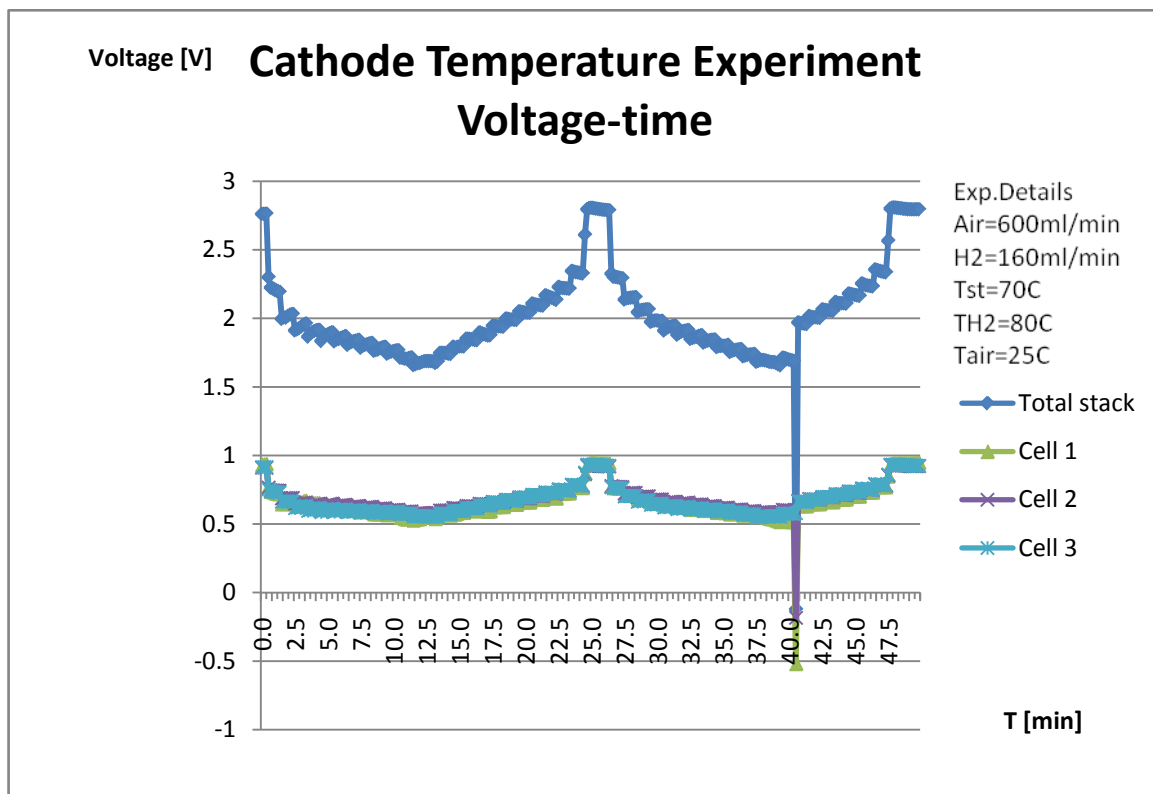
Στο πείραμα αυτό η παροχή είναι 160 ml/min για τον αέρα και 600 ml/min για το υδρογόνο. Εκτελούνται 2 βηματικές σκάλες ρεύματος με μέγιστο ρεύμα 6 A, με βήμα 0,5 A και χρονική διάρκεια 1 min.

Πίνακας 4.9. Περιγραφή συνθηκών πειράματος θερμοκρασίας εφυγραντήρα καθόδου.

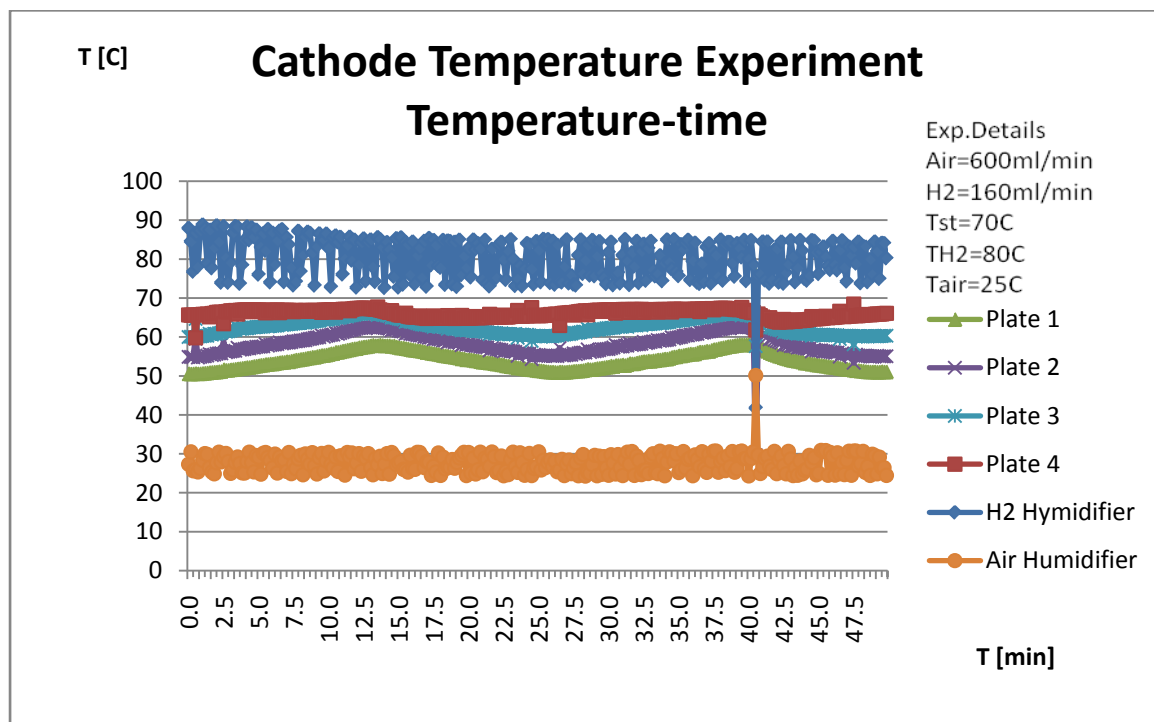
Πείραμα θερμοκρασίας εφυγραντήρα καθόδου												
	Παροχή H ₂	Παροχή Αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
			Αρχική τιμή ρεύματος	Τελική τιμή ρεύματος	Βήμα			Συστοίχιας Κυψελών	Υγραντήρα H ₂	Υγραντήρα Αέρα	H ₂	Αέρα
	ml/min	ml/min	A	A	A	-	min	°C	°C	°C	psig	psig
1	160	600	0	6	0.5	2	1	60	80	25	0	0
2	160	600	0	6	0.5	2	1	60	80	40	0	0
3	160	600	0	6	0.5	2	1	60	80	55	0	0



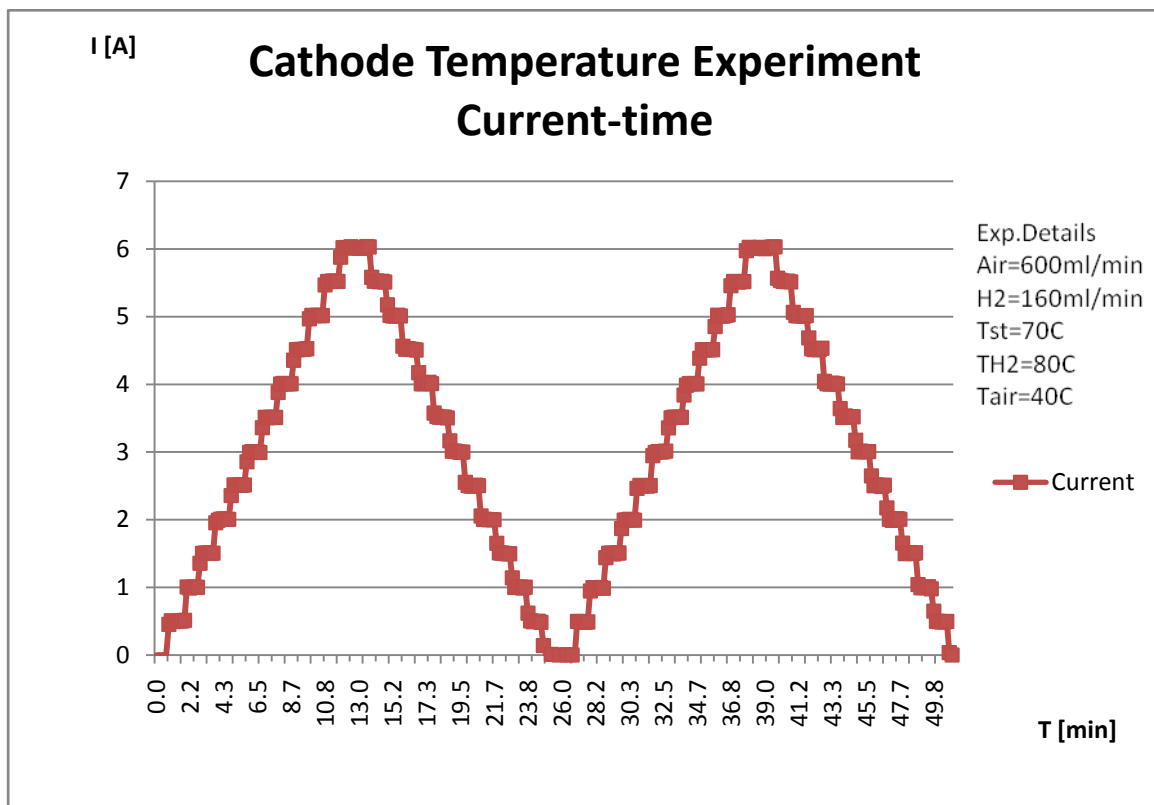
Σχ. 4.73. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H₂=160 ml, Air=600 ml, T_{cathode}=25°C)-πείραμα καθόδου.



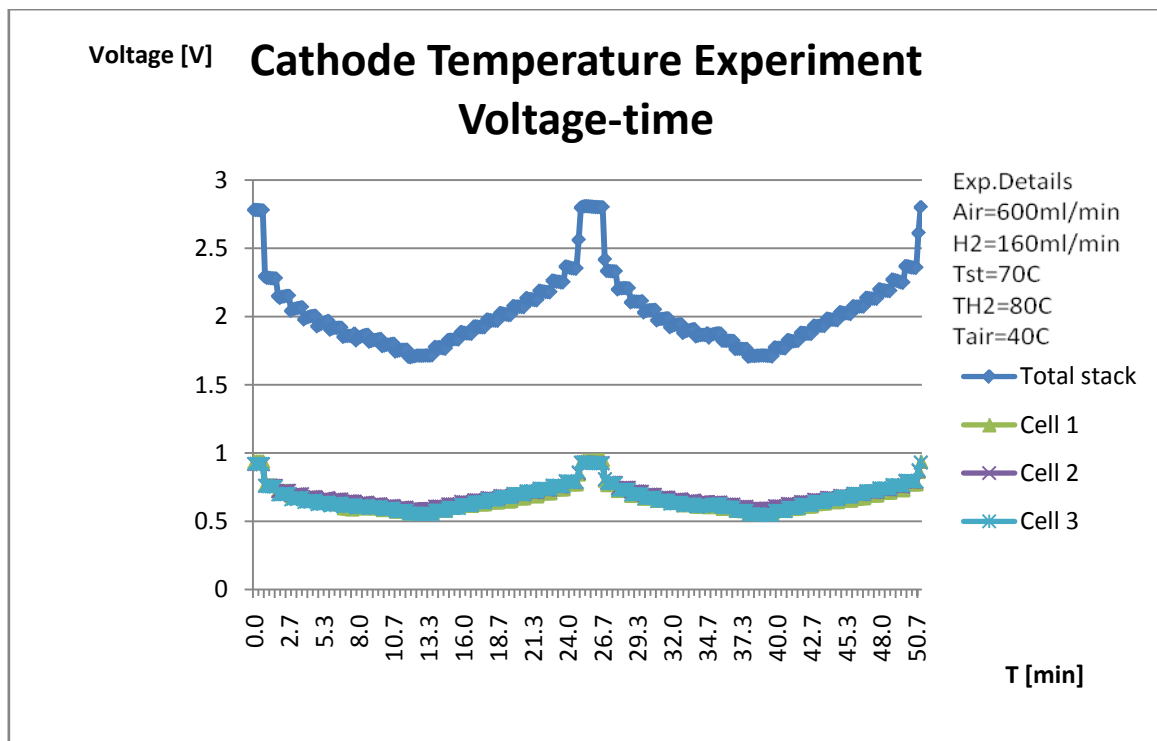
Σχ. 4.74. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tcathode=25°C)-πείραμα καθόδου.



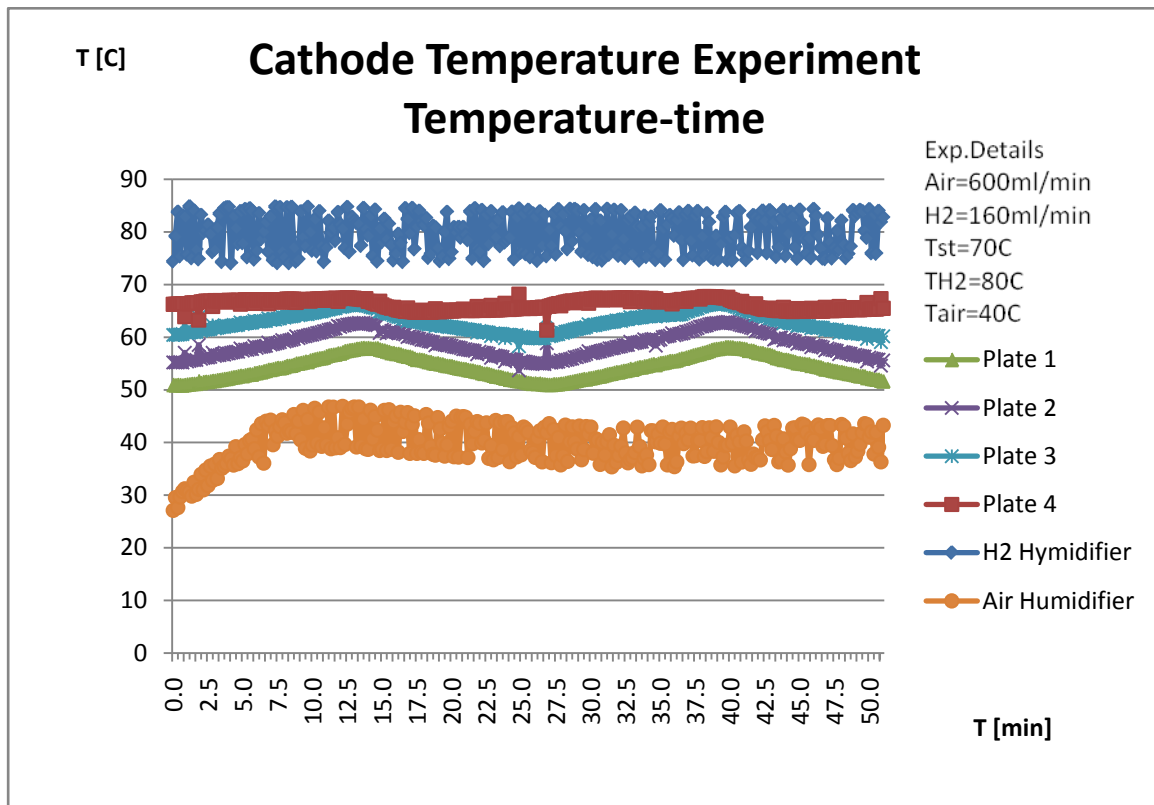
Σχ. 4.75. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tcathode=25°C)-πείραμα καθόδου.



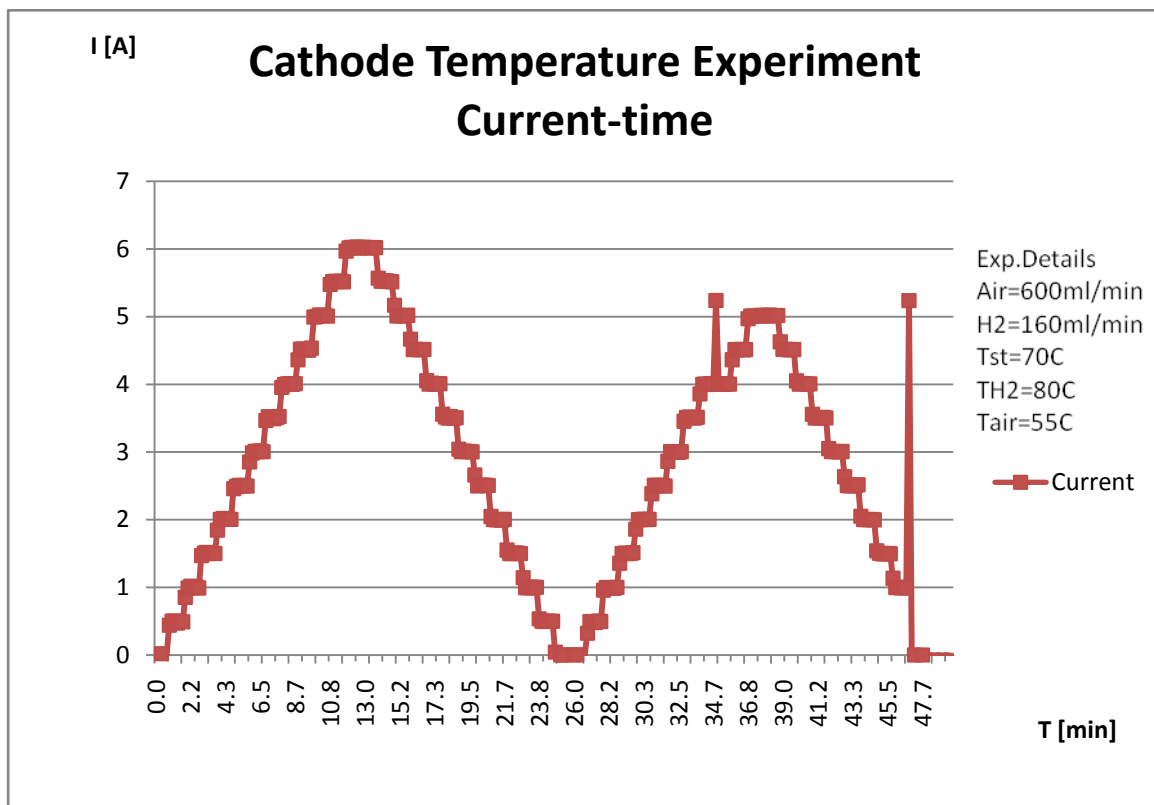
Σχ. 4.76. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H₂=160 ml, Air=600 ml, T_{cathode}=40°C)-πείραμα καθόδου.



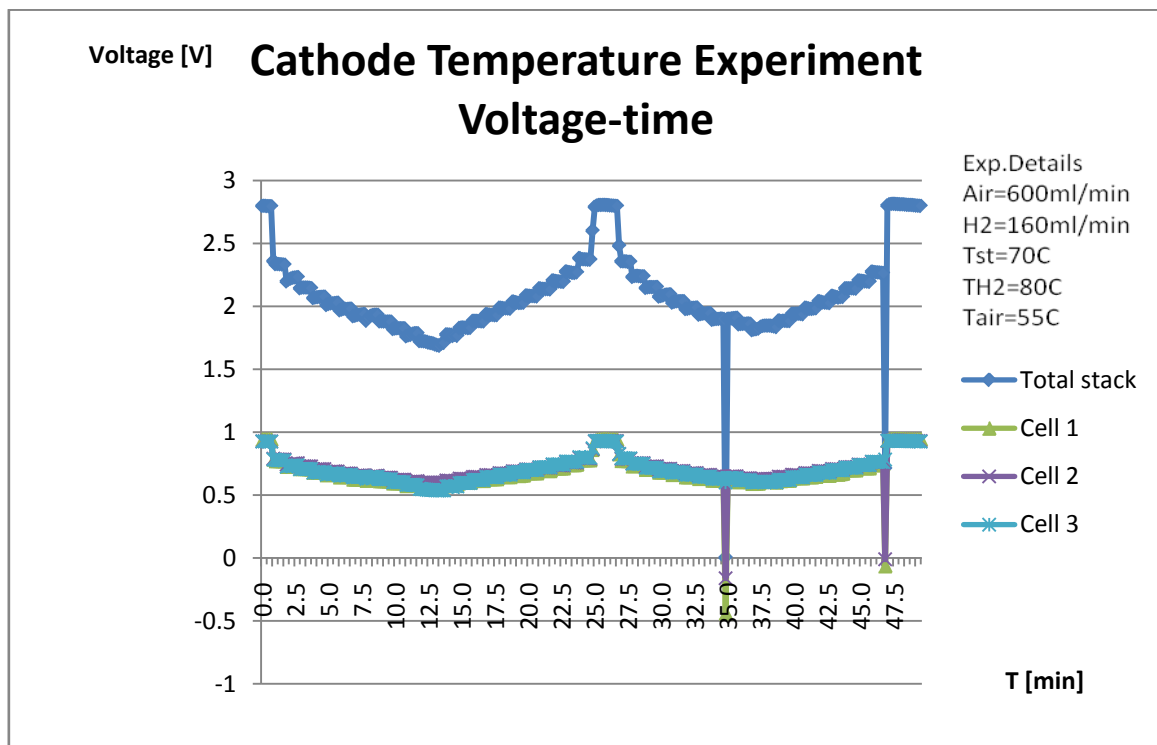
Σχ. 4.77. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H₂=160 ml, Air=600 ml, T_{cathode}=40°C)-πείραμα καθόδου.



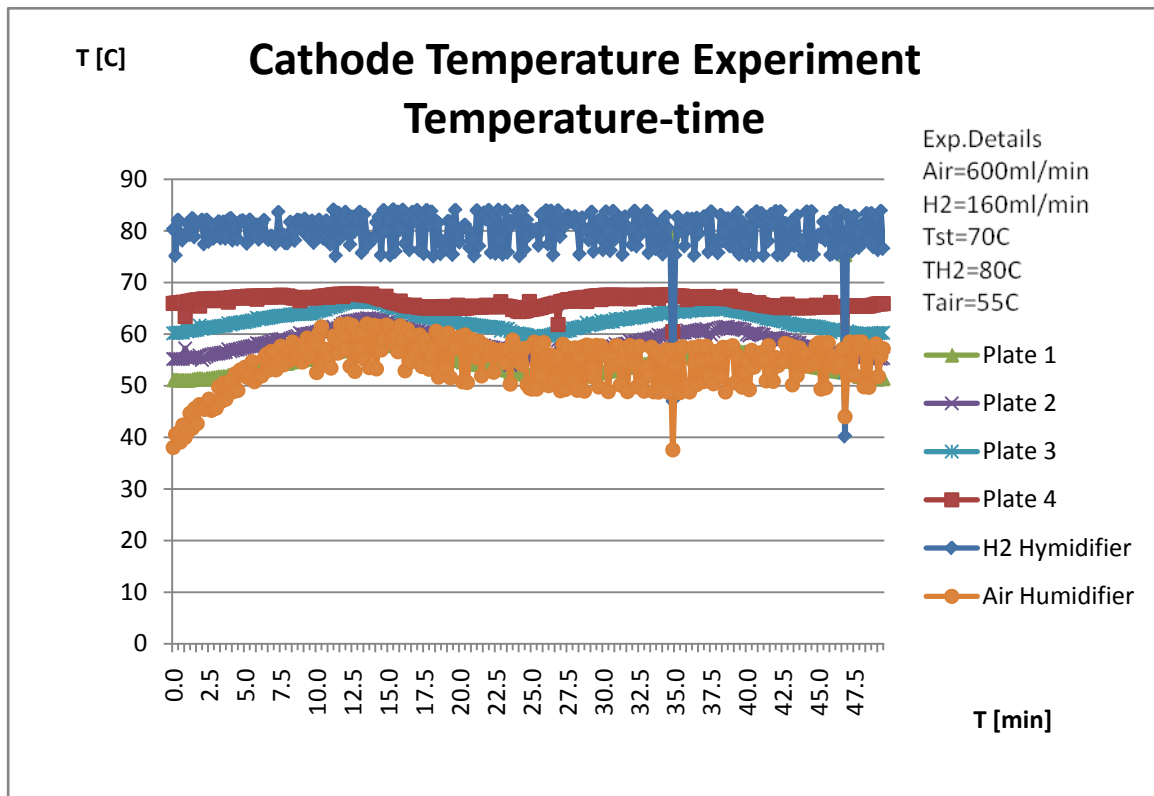
Σχ. 4.78. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου(H2=160 ml, Air=600 ml, Tcathode=50°C)-πείραμα καθόδου.



Σχ. 4.79. Διάγραμμα Ρεύματος-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tcathode=55°C)-πείραμα καθόδου.



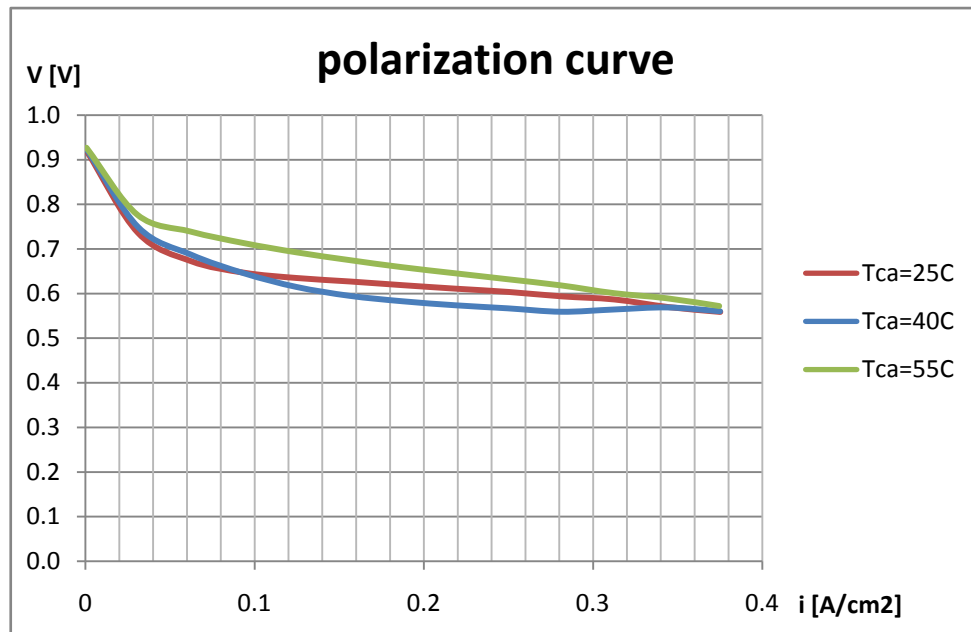
Σχ. 4.80. Διάγραμμα τάσης-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tcathode=55°C)-πείραμα καθόδου.



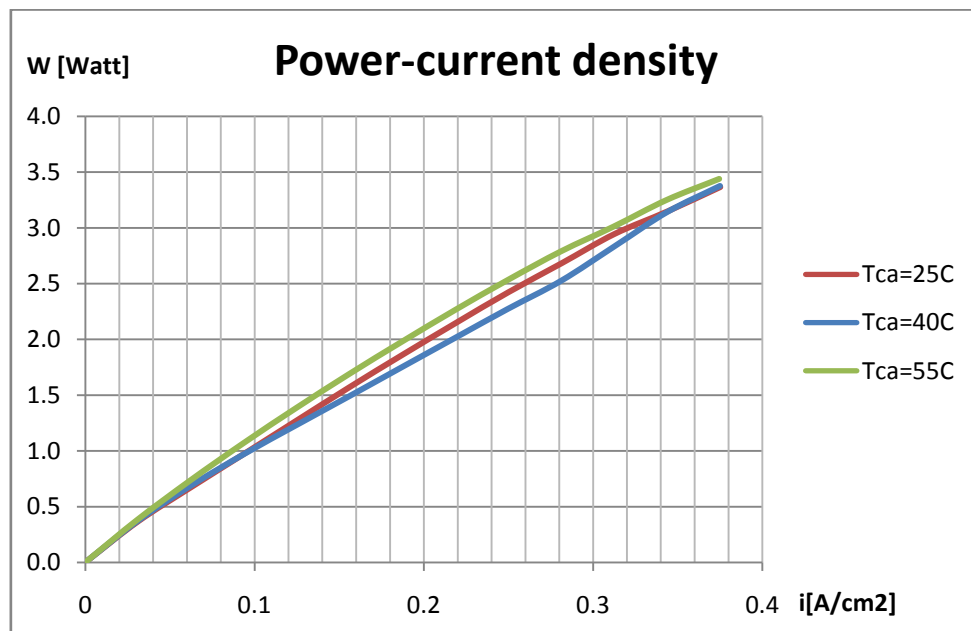
Σχ. 4.81. Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου (H2=160 ml, Air=600 ml, Tcathode=55°C)-πείραμα καθόδου.

Παρατηρήσεις – Σχόλια στα διαγράμματα θερμοκρασιών καθόδου

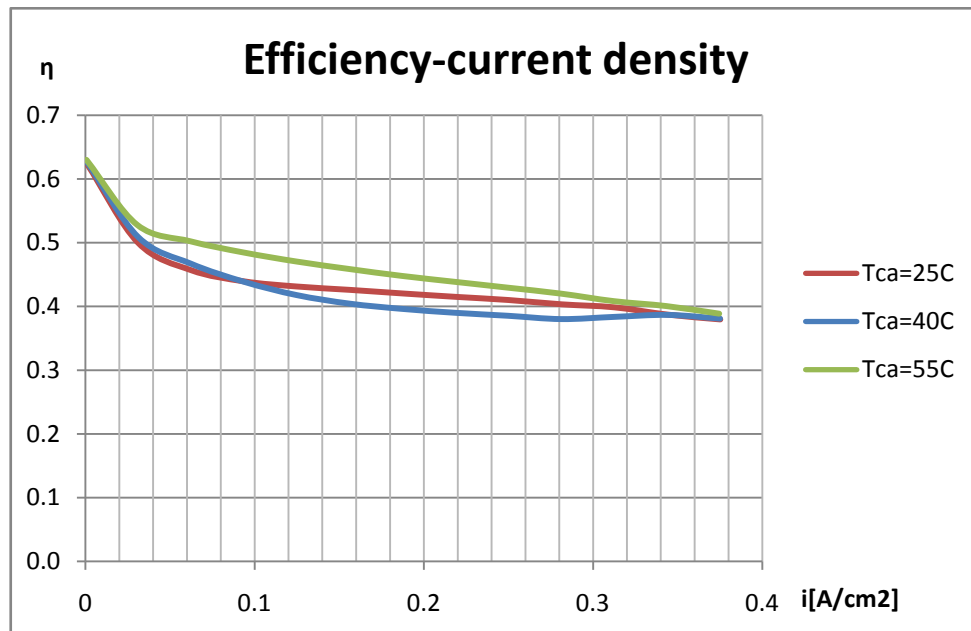
Σχεδιάζουμε τα διαγράμματα $i - V$, $i - P$, $i - \eta$ για τα δεδομένα των πειραμάτων που έχουμε από τα τρία πειράματα θερμοκρασιών καθόδου (25°C , 40°C , 55°C) που εκτελέστηκαν παραπάνω.



Σχ. 4.82. Καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος για πειράματα θερμοκρασιών καθόδου.



Σχ. 4.83. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για πειράματα θερμοκρασιών καθόδου.



Σχ. 4.84. Καμπύλη βαθμού απόδοσης για πειράματα θερμοκρασιών καθόδου.

Από τα διαγράμματα των Σχ. 4.82-4.84 δεν μπορούν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα.

4.7 Πειράματα προδιαγεγραμμένα από τον μελετητή

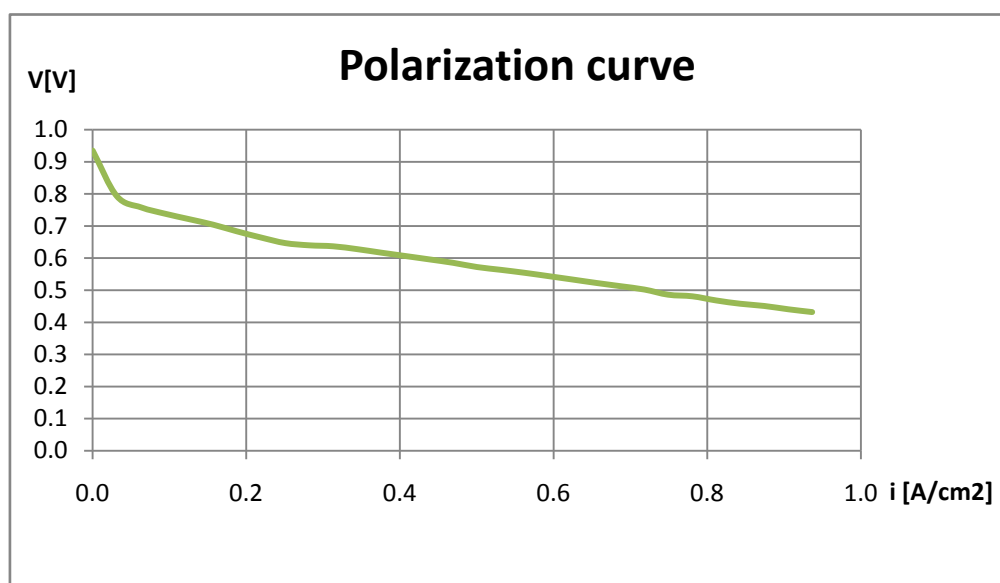
Πέραν των προδιαγεγραμμένων πειραμάτων από τον κατασκευαστή, σε αυτή την ενότητα θα αναφερθεί ένα πείραμα προδιαγεγραμμένο από τον μελετητή. Αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκε για να συμπληρωθούν τα δεδομένα που χρειαζόμαστε για τη σχεδίαση της καμπύλης τάσης – πυκνότητας ρεύματος και να εξαχθούν πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα.

Στο πείραμα αυτό εκτελέσαμε μια κλιμακωτή σκάλα ρεύματος (current staircase) από 0-15 A με βήμα 0.5 A και χρόνο διάρκειας κάθε βήματος 60 s. Οι θερμοκρασίες ρυθμίστηκαν ως εξής : θερμοκρασία συστοιχίας 60°C, θερμοκρασία εφυγραντήρα υδρογόνου 80°C και εφυγραντήρα αέρα 30°C. Οι παροχές των αερίων ρυθμίστηκαν Air=3 st, H₂=1.5 st.

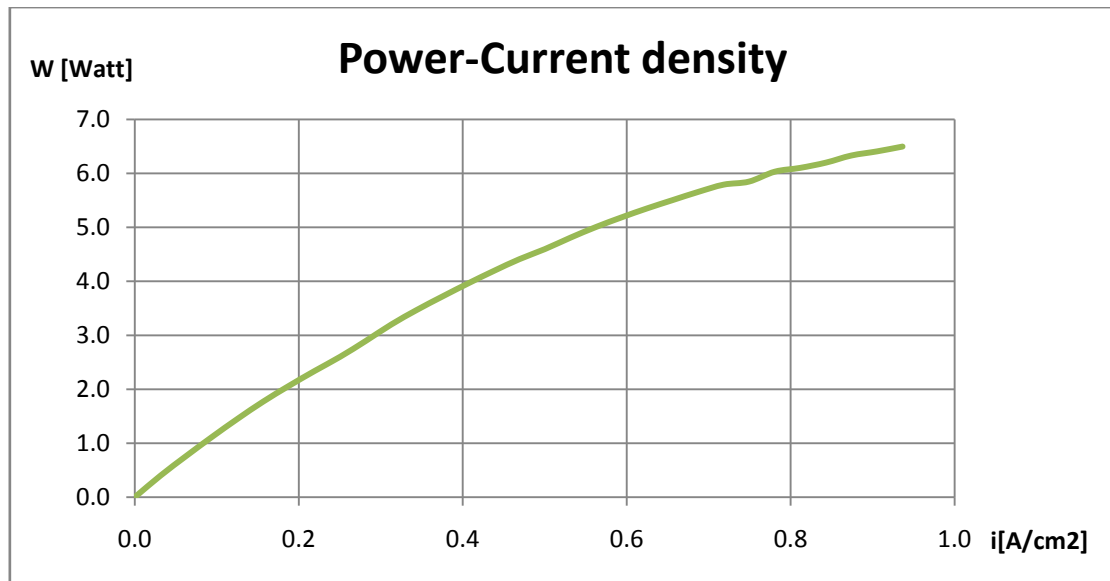
Πίνακας 4.9. Περιγραφή συνθηκών πειράματος προδιαγεγραμμένου από μελετητή.

Πείραμα προδιαγεγραμμένο από τον μελετητή											
Παροχή H ₂	Παροχή Αέρα	Βηματική Κλίμακα Ρεύματος			Αριθμός Κλιμάκων	Χρόνος /βήμα	Θερμοκρασία			Πίεση	
		Αρχική τιμή ρεύματος	Τελική τιμή ρεύματος	Βήμα			Συστοιχίας Κυψελών	Υγραντήρα H ₂	Υγραντήρα Αέρα	H ₂	Αέρα
st	st	A	A	A	-	min	°C	°C	°C	psig	psig
1.5	3	0	15	0.5	1	1	60	80	30	0	0

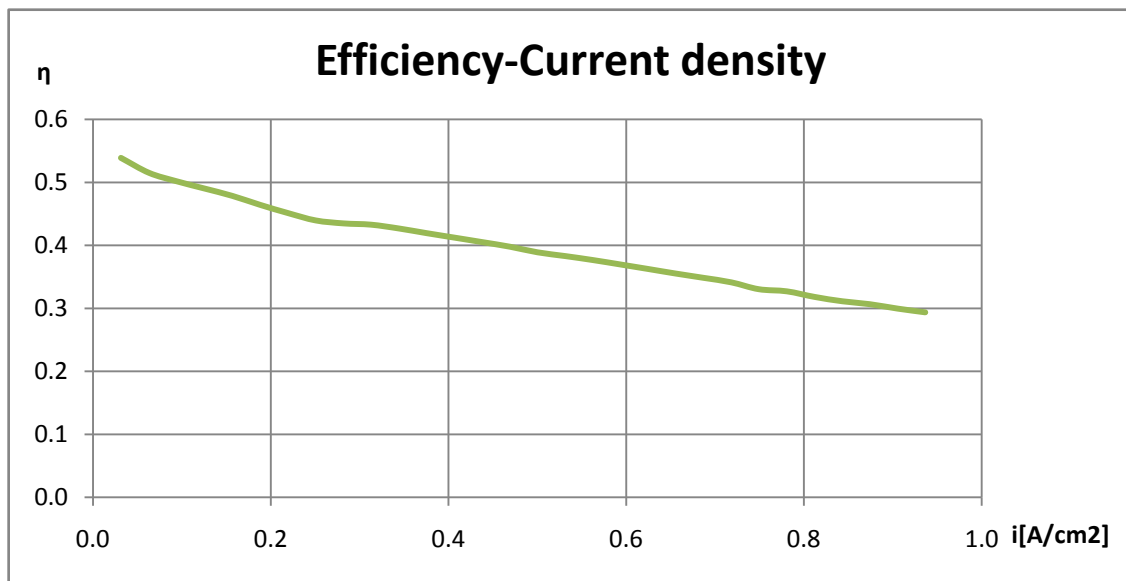
Έτσι έχουμε τα εξής διαγράμματα:



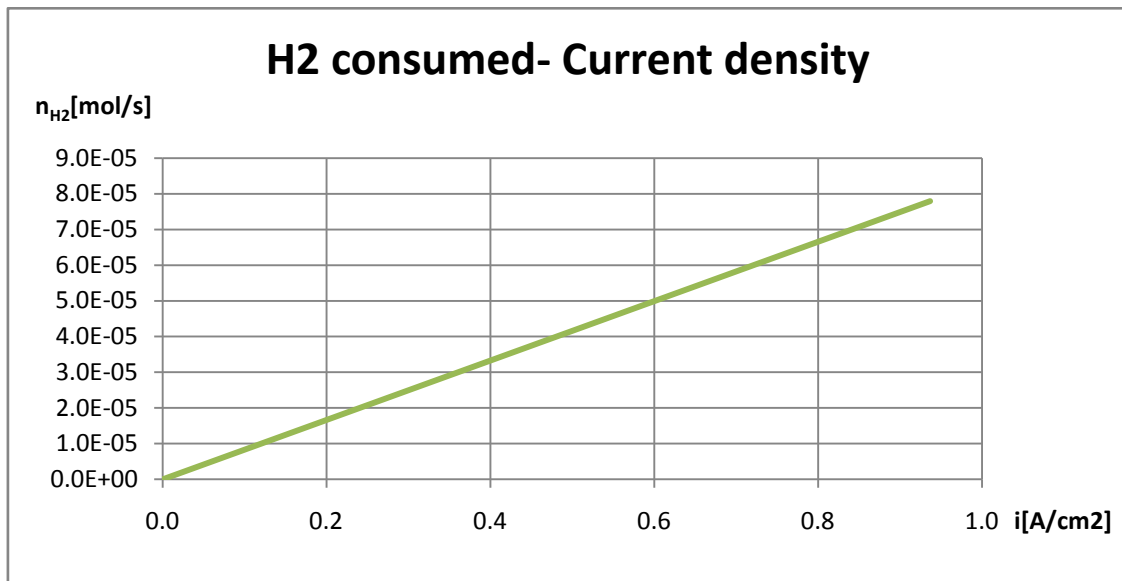
Σχ. 4.85. Καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος για πείραμα προδιαγεγραμμένο από κατασκευαστή.



Σχ. 4.86. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για πείραμα προδιαγεγραμμένο από κατασκευαστή.



Σχ. 4.87. Καμπύλη Βαθμού απόδοσης-πυκνότητας ρεύματος για πείραμα προδιαγεγραμμένο από κατασκευαστή.



Σχ. 4.88. Καμπύλη κατανάλωσης υδρογόνου-πυκνότητας ρεύματος για πείραμα προδιαγεγραμμένο από κατασκευαστή.

Παρατηρήσεις – Σχόλια

Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα του Σχ.4.85 η καμπύλη αυτή στην τελευταία περιοχή του διαγράμματος δεν παρουσιάζει την χαρακτηριστική περιοχή των απωλειών λόγω συγκέντρωσης. Αυτό συμβαίνει ίσως γιατί στο πείραμα έχουμε πλεονάζοντα αντιδρώντα αέρια και έτσι δεν παρουσιάζεται καθόλου το φαινόμενο των απωλειών λόγω συγκέντρωσης. Χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι στο διάγραμμα Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος δεν έχουμε μέγιστο και η καμπύλη συνεχίζει αύξουσα.

Κεφάλαιο 5

Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Σε αυτό το κεφάλαιο, από τα δεδομένα των πειραμάτων του Κεφαλαίου 4 σχεδιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες και γίνεται προσπάθεια ανάλυσής τους ώστε να προκύψουν οι τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται σε ημιεμπειρικές εξισώσεις σχετικές με τις κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης. Οι τιμές των παραμέτρων υπολογίζονται με γραφικό ή αναλυτικό τρόπο με σκοπό να αντικατασταθούν στις αναλυτικές εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης ώστε το μοντέλο να περιγράφει πια την συστοιχία κυψελών του δοκιμαστηρίου. Απώτερος στόχος είναι η σύγκριση των αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων και η εύρεση και εξήγηση ενδεχόμενων αποκλίσεων.

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν δυο ομάδων χαρακτηριστικές καμπύλες και θα δούμε σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων. Η πρώτη ομάδα καμπυλών είναι για χαρακτηριστική παροχή $Air=400$ ml/min, $H_2=200$ ml/min, η δεύτερη είναι για $Air=3$ (stoichiometric), $H_{2st}=1.5$ (stoichiometric) με δεδομένα της TVN και η τρίτη με δεδομένα από πείραμα για $Air=3$ (stoichiometric), $H_{2st}=1.5$ (stoichiometric). Όλα τα πειράματα έχουν εκτελεστεί με δεδομένα $T_{st}=60$ °C, $T_{H_2}=80$ °C, $T_{Air}=30$ °C.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

5.1 Πρώτη ομάδα διαγραμμάτων (Air=400 ml/min, H2=200 ml/min)

Από τα δεδομένα του πειράματος, τα οποία παρατίθενται και στον **Πίνακα 5.1**, σχεδιάζονται τα διαγράμματα των Σχ. 5.1- 5.5 και υπολογίζονται χαρακτηριστικές παράμετροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης των κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 5.1. Δεδομένα πειράματος (Air=400 ml/min, H2=200 ml/min).

a/a	i	I	V	P	η	cons H2	ln (i)	PH2	PO2	T	Vthermo	Vext	ΔV _Ω	Vcat	ΔV
	A/cm ²	A	V	Watt	-	mol /sec	-	atm	atm	K	V	V	V	V	V
1	0.000622665	0.01000	0.91941	0.009194	0.6247	5.1821E-08	-7.3815	1	1	333	1.1985	0.91941	0.0003014	0.91971	0.27879
2	0.031120423	0.49979	0.75819	0.378938	0.5152	2.5900E-06	-3.4699	1	1	333	1.1985	0.75819	0.0150648	0.77325	0.42525
3	0.062281569	1.00024	0.71506	0.715229	0.4859	5.1834E-06	-2.7761	1	1	333	1.1985	0.71506	0.0301493	0.74521	0.45329
4	0.093517061	1.50188	0.68374	1.026898	0.4646	7.7830E-06	-2.3696	1	1	333	1.1985	0.68374	0.0452698	0.72901	0.46949
5	0.124707347	2.00280	0.65866	1.319159	0.4475	1.0379E-05	-2.0818	1	1	333	1.1985	0.65866	0.0603684	0.71903	0.47947
6	0.156110461	2.50713	0.63715	1.597429	0.4329	1.2992E-05	-1.8572	1	1	333	1.1985	0.63715	0.0755701	0.71272	0.48578
7	0.186864757	3.00105	0.61786	1.854237	0.4198	1.5552E-05	-1.6774	1	1	333	1.1985	0.61786	0.0904576	0.70832	0.49018
8	0.218362142	3.50690	0.59898	2.100561	0.4070	1.8173E-05	-1.5216	1	1	333	1.1985	0.59898	0.1057049	0.70468	0.49382
9	0.249722291	4.01054	0.57948	2.324046	0.3937	2.0783E-05	-1.3874	1	1	333	1.1985	0.57948	0.1208858	0.70037	0.49813
10	0.280983562	4.51260	0.55763	2.516351	0.3789	2.3385E-05	-1.2695	1	1	333	1.1985	0.55763	0.1360188	0.69365	0.50485
11	0.312164882	5.01337	0.53254	2.669797	0.3618	2.5980E-05	-1.1642	1	1	333	1.1985	0.53254	0.151113	0.68365	0.51485
12	0.343503861	5.51667	0.49509	2.731226	0.3364	2.8588E-05	-1.0686	1	1	333	1.1985	0.49509	0.1662836	0.66137	0.53713
13	0.373696015	6.00156	0.39370	2.362792	0.2675	3.1101E-05	-0.9843	1	1	333	1.1985	0.39370	0.1808991	0.57460	0.62390

Για να συμπληρωθεί αυτός ο πίνακας υπολογίστηκαν αρχικά από το πείραμα τα μεγέθη I , V και στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα υπόλοιπα μεγέθη σύμφωνα με τις σχέσεις που ορίζονται στο εγχειρίδιο του δοκιμαστήριου RU-2101:

Πυκνότητα ρεύματος

$$i = \frac{I}{A} \text{ [A/cm}^2\text{]} \quad (5.1.1)$$

Ισχύς

$$\dot{W} = I \cdot V \text{ [Watt]} \quad (5.1.2)$$

Κατανάλωση υδρογόνου

$$I = q_e \cdot \dot{n}_{H_2} \rightarrow I = n_e \cdot F \cdot \dot{n}_{H_2} \quad (5.1.3)$$

$$q_e = n_e \cdot F$$

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

οπότε:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{I}{ne \cdot F} \text{ [mol/s]} \quad (5.1.4)$$

Όπου, F η σταθερά του Faraday :

$$F = 96485,3 \frac{Cb}{mol} \quad (5.1.5)$$

Βαθμός απόδοσης κυψέλης

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{n}_{H_2} \cdot \tilde{H}_{H_2}} \quad (5.1.6)$$

όπου :

$$\tilde{H}_{H_2} = 284 \frac{kJ}{mol} \quad (5.1.7)$$

η ανώτερη θερμογόνος ικανότητα του υδρογόνου.

Ως πίεση αέρα και υδρογόνου θεωρούμε την πίεση λειτουργίας της συστοιχίας, η οποία είναι 1 atm.

Ως θερμοκρασία θεωρούμε την θερμοκρασία της συστοιχίας που είναι :

$$T = 60^\circ C = 333.15 K \quad (5.1.8)$$

Τα υπόλοιπα μεγέθη των τάσεων έχουν ως εξής :

$$V_{thermo} = 1.23 - 0.0009(T - 298) + \frac{R \cdot T}{4 \cdot F} \cdot \ln(P_{H_2}^2 \cdot P_{O_2}) \text{ [V]} \quad (5.1.9)$$

Για την οποία ισχύουν:

$$T : \text{Kelvin}, R : \frac{kJ}{kg \cdot K}, P : atm, F : \frac{Cb}{mol}$$

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

η οποία είναι ημιεμπειρική σχέση που βασίζεται στην αναλυτική σχέση:

$$E_{rev} = E_{rev}(P^0, T) + \frac{1}{2 \cdot F} \tilde{R} \cdot T \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{P_{H_2}}{P^0} \right) \cdot \left(\frac{P_{O_2}}{P^0} \right)^{0.5}}{\left(\frac{P_{H_2O}}{P^0} \right)} \right] \quad (5.1.10)$$

$$V_{cat} = V_{ext} + \Delta V_{\Omega} [\text{V}] \quad (5.1.11)$$

Όπου:

V_{thermo} ημιεμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της θεωρητικής τάσης για τις δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης

V_{ext} η μετρούμενη από το πείραμα τάση

ΔV_{Ω} οι ωμικές απώλειες της τάσης.

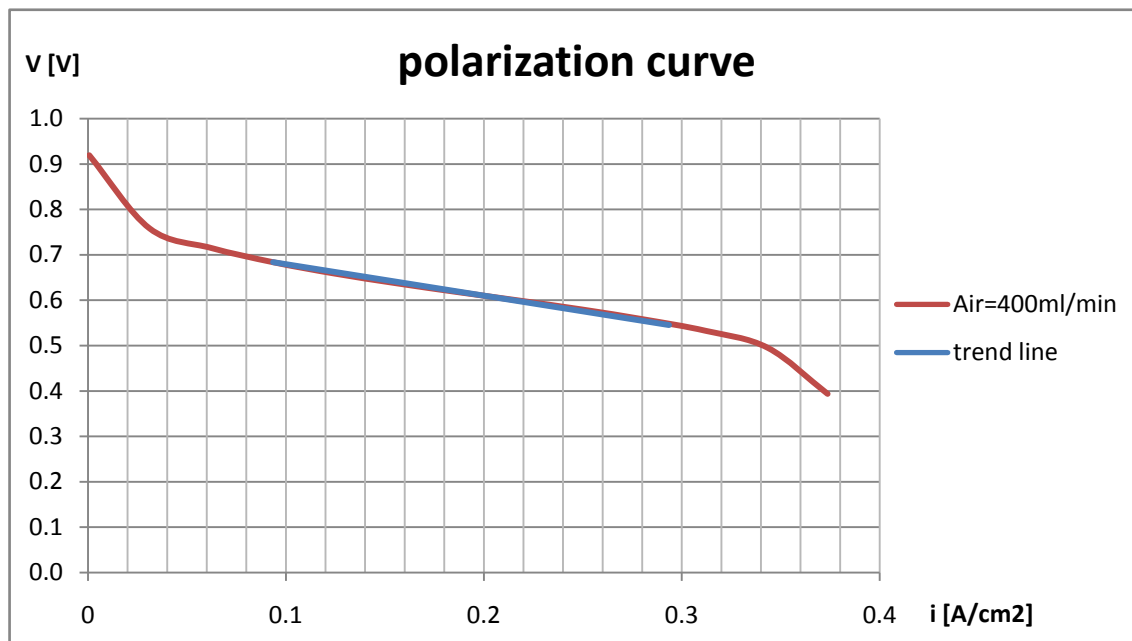
$$\Delta V_{\Omega} = i \cdot R_{\Omega} [\text{V}] \quad (5.1.12)$$

και

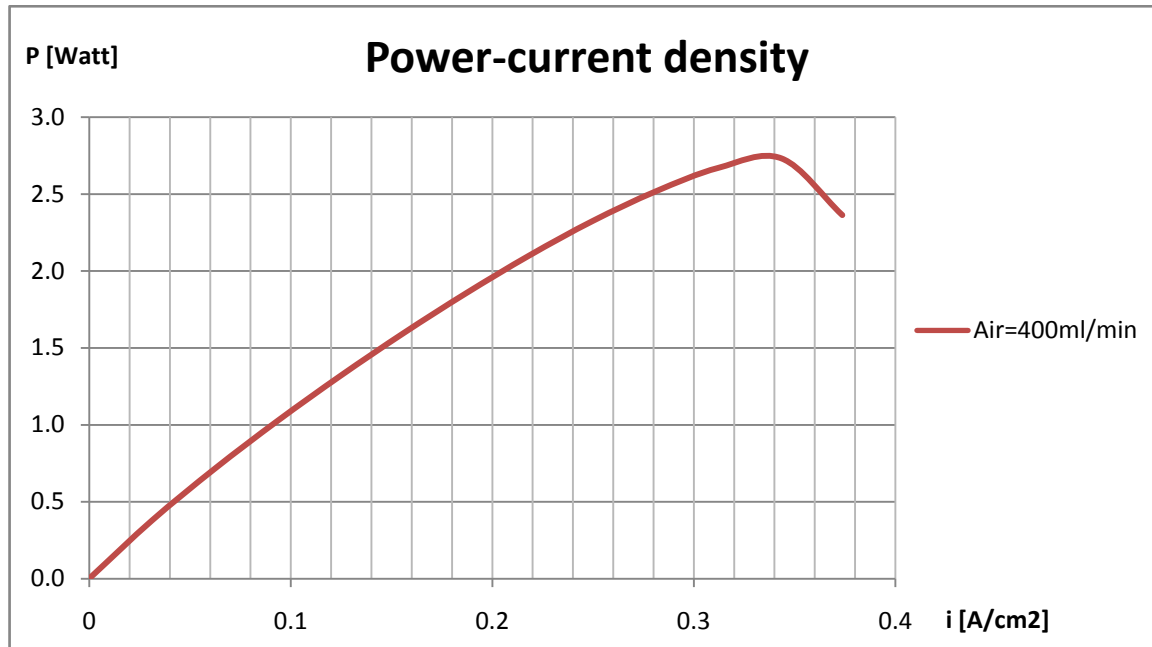
$$\Delta V_{\Omega} = V_{thermo} - V_{cat} = V_{thermo} - (V_{ext} + \Delta V_{\Omega}) [\text{V}] \quad (5.1.13)$$

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Με βάση αυτή την ανάλυση και τον Πίνακα 5.1 έχουμε τα εξής διαγράμματα:

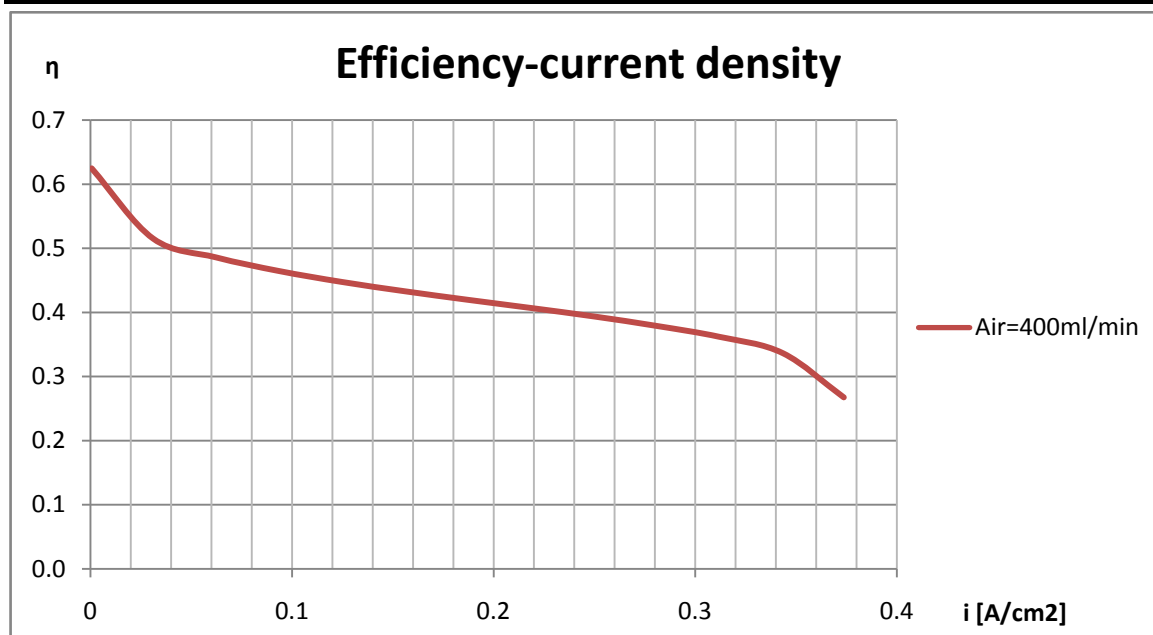


Σχ. 5.1. Καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος για Air=400 ml/min, H₂=200 ml/min.



Σχ. 5.2. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για Air=400 ml/min, H₂=200 ml/min.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο



Σχ. 5.3. Καμπύλη βαθμού απόδοσης-πυκνότητας ρεύματος για Air=400 ml/min, H₂=200 ml/min.

Στο Σχ.5.1. έχει σχεδιαστεί η καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος καθώς και το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης αυτής. Από την κλίση της ευθείας αυτής μπορεί να υπολογιστεί η εσωτερική αντίσταση R_{Ω} σύμφωνα με την σχέση :

$$R_{\Omega} = \lambda \cdot 0.7 \quad (5.1.14)$$

όπου, λ η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης τάσης – πυκνότητας ρεύματος. Η κλίση αυτή υπολογίζεται ώστε να βρεθεί από το ευθύγραμμο τμήμα η τιμή της ωμικής αντίστασης. Η Εξ. (5.1.13) είναι πειραματική – εμπειρική εξίσωση, που αν αντικαταστήσουμε τα δεδομένα του διαγράμματος έχουμε :

$$R_{\Omega} = \lambda \cdot 0.7 = -(-0.69154) \cdot 0.7 = 0.4841 \text{ Ohm} \quad (5.1.15)$$

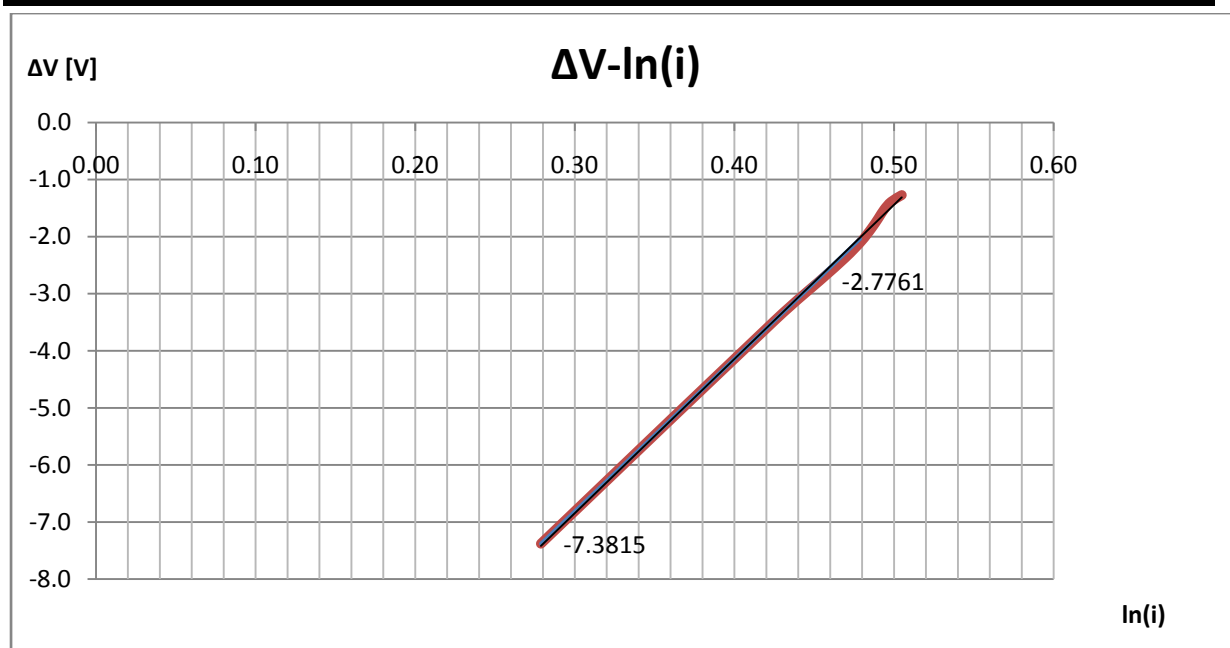
Από τον υπολογισμό του R_{Ω} μπορεί να υπολογιστεί και η ΔV και συμπληρώνεται ο Πίνακας 5.1. Στη συνέχεια σχεδιάζεται το διάγραμμα $\Delta V - \ln(i)$ και υπολογίζονται χαρακτηριστικά μεγέθη,

όπου, η ΔV ορίζεται από την σχέση :

$$\Delta V = V_{\text{thermo}} - V_{\text{cat}} \quad (5.1.16)$$

η οποία, σύμφωνα με τις οδηγίες υπολογισμών του εγχειριδίου του δοκιμαστηρίου RU-2101, είναι και η τάση ενεργοποίησης της κυψέλης.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο



Σχ. 5.4. Καμπύλη $\Delta V - \ln(i)$ για Air=400 ml/min, H2=200 ml/min.

Οι σχέσεις (5.1.16-5.1.20) στηρίζονται στην επίλυση της εξίσωσης :

$$i = i_o^* \cdot \varepsilon \cdot P_{O_2}^b \exp\{\beta \cdot \Delta V\} \quad (5.1.17)$$

Που διέπει όλα τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα και η επίλυσή της μας δίνει τις παραμέτρους της περιοχής των απωλειών ενεργοποίησης του διαγράμματος τάσης – πυκνότητας ρεύματος (polarization curve).

Από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης του Σχ. 5.4 και την τομή που έχει με τον άξονα ΔV βρίσκουμε χαρακτηριστικά μεγέθη.

$$\beta = \kappa = 26.7181 \quad (5.1.18)$$

Από το σημείο τομής με τον άξονα ΔV έχουμε :

$$b = -14.8297 \text{ V} \quad (5.1.19)$$

Έτσι υπολογίζουμε το γινόμενο,

$$i_o^* \cdot P_{O_2}^b = \exp(b) = \exp(-14.8297) = 3.63E-07 \quad (5.1.20)$$

Και εφόσον :

$$P_{O_2}^b = 1 \text{ atm} \quad (5.1.21)$$

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Άρα έχουμε:

$$i_o^* = 3.63E-07 \text{ C / s / cm}^2 \quad (5.1.22)$$

$$a = \beta \cdot \frac{R \cdot T}{F} = 26.7181 \frac{8.314 \cdot 333}{96485.3} = 0.7667 \quad (5.1.23)$$

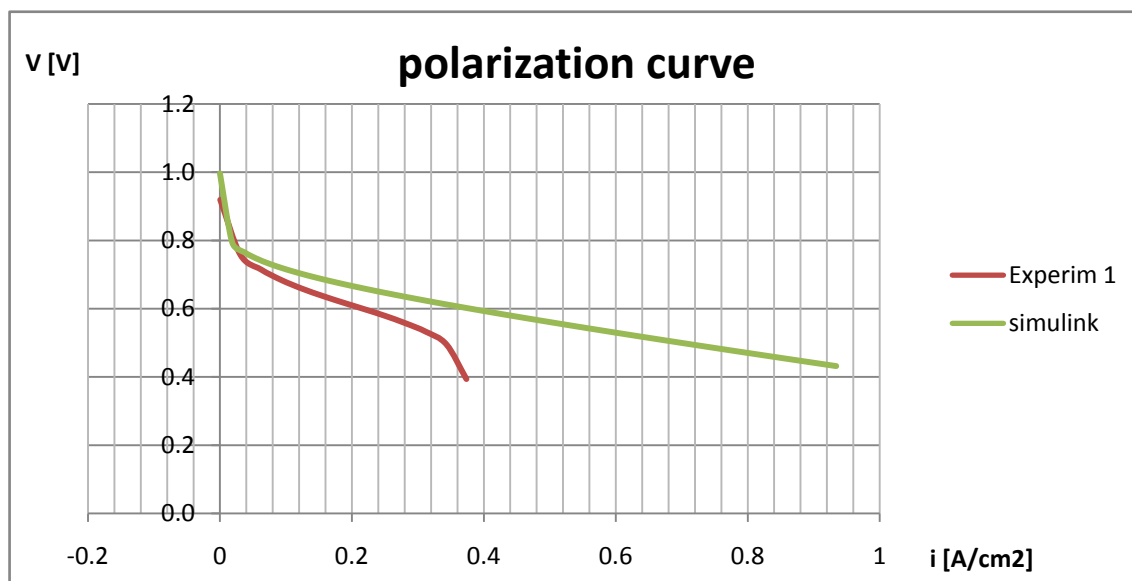
Αυτές οι τιμές είναι εξαιρετικά κοντά στις τιμές που έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία για κυψέλες καυσίμου για τις δεδομένες συνθήκες.

$$a = 1 \quad (5.1.24)$$

$$i_o = 1.0E-7 - 1.0E-8$$

Σύγκριση με μοντέλο προσομοίωσης

Στη συνέχεια θα γίνει προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο προσομοίωσης έχει λειτουργήσει με τις τιμές των παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί από το δεδομένο πείραμα.



Σχ. 5.5. Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με δεδομένα προσομοίωσης.

Η κόκκινη καμπύλη περιγράφεται με την γενική εξίσωση :

$$V = E - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{act} - \Delta V_{trans}$$

$$V = E - i \cdot r - A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) + m \cdot \exp(n \cdot i) \quad (5.25)$$

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Υπολογίζουμε με παραμετρική ανάλυση δεδομένων τους συντελεστές (για να επαληθευτούν και να συμπληρωθούν αυτά που έχουν ήδη υπολογιστεί με τα διαγράμματα) :

$$r = 0.696 \text{ kWcm}^2 \Rightarrow R_{\Omega} = 0.4872 \text{ Ohm}$$

$$A = -0.043 \text{ V}$$

$$i_o = 1063535.9 \text{ A/cm}^2$$

$$m = 2.31 \text{ V}$$

$$n = 4.633 \text{ cm}^2\text{mA}^{-1}$$

Κατά τη διάρκεια της παραμετρικής ανάλυσης δεδομένων προσπαθούμε στο πρόγραμμα Excel να βρούμε για κάθε τμήμα της καμπύλης τάσης – πυκνότητας ρεύματος του πειράματος του Σχ. 5.5 τις παραμέτρους της Εξ. (5.23) που την περιγράφουν ικανοποιητικά, ώστε να έχουμε μια μαθηματική αναπαράσταση των πειραματικών δεδομένων. Έτσι το πρώτο τμήμα (περιοχή απωλειών λόγω ενεργοποίησης) προσεγγίζεται με μια λογαριθμική καμπύλη και υπολογίζονται οι παράμετροι i_o , A , το δεύτερο τμήμα προσεγγίζεται με μια ευθεία και υπολογίζεται έτσι η r και τέλος το τρίτο τμήμα της καμπύλης προσεγγίζεται με μια εκθετική καμπύλη και υπολογίζονται οι παράμετροι m , n .

Από ό,τι βλέπουμε τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινη γραμμή) δεν συμβαδίζουν με τα δεδομένα της προσομοίωσης και παρουσιάζουν έντονη απόκλιση κυρίως για τους εξής λόγους :

- Η καμπύλη της προσομοίωσης έχει χαραχθεί με δεδομένα $A_{ir}=3\text{st}$, $H_2=1.5\text{st}$, ενώ η καμπύλη των πειραματικών δεδομένων με δεδομένα $A_{ir}=400\text{ml/min}$, $H_2=200\text{ml/min}$, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η στοιχειομετρία στην δεύτερη περίπτωση δεν είναι σταθερή καθόλη την διάρκεια του πειράματος, λόγω του ότι η στοιχειομετρία αλλάζει με την μεταβολή του ρεύματος. Άρα δεν έχουν χαραχθεί οι καμπύλες με τα ίδια ακριβώς δεδομένα, κάτι το οποίο δεν ήταν δυνατό λόγω της κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο και λειτουργεί με σταθερές τιμές στοιχειομετρίας.
- Υπάρχει γενικότερα αμφιβολία για τα πειραματικά δεδομένα και την ακρίβεια αυτών λόγω του ότι η συσκευή είναι ευαίσθητη και παρουσίασε κατά την λειτουργία της πολλές βλάβες και γενικά μια ασταθή συμπεριφορά στην συλλογή των δεδομένων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις (υποενότητες 5.2, 5.3) οπότε δεν θα επεξηγηθεί περαιτέρω.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

5.2 Δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων (Air=3 st, H2=2 st, TVN data)

Από τα δεδομένα του πειράματος, τα οποία παρατίθενται και στον Πίνακα 5.2, σχεδιάζονται τα διαγράμματα των Σχ. 5.5- 5.9 και υπολογίζονται χαρακτηριστικές παράμετροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης των κυψελών καυσίμου.

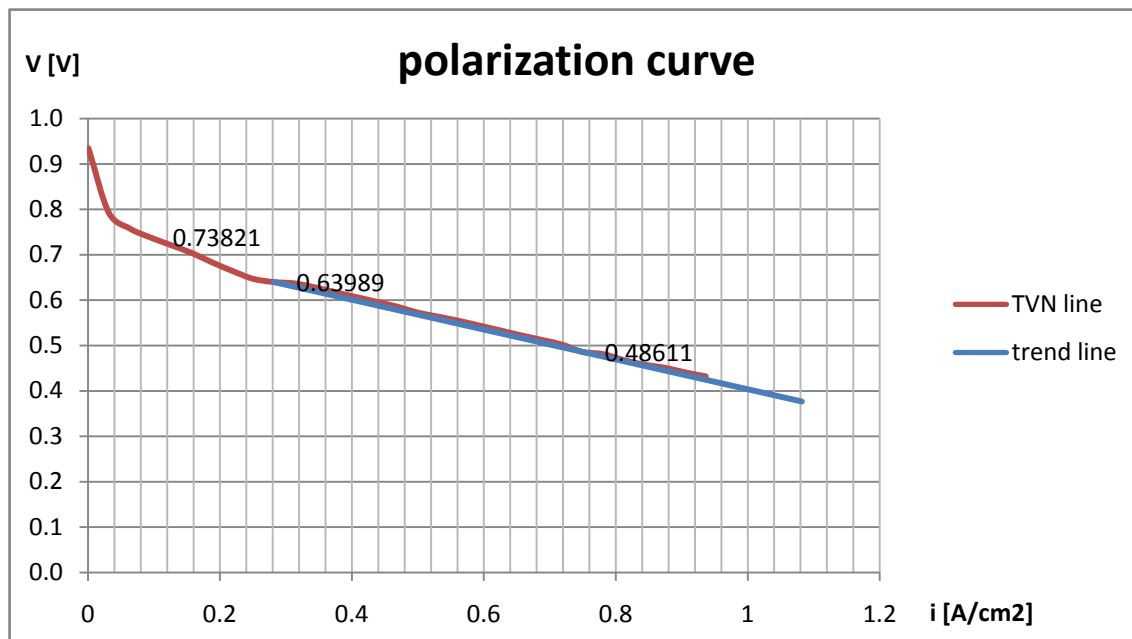
Πίνακας 5.2. Δεδομένα πειράματος (Air=3 st, H2=2 st).

a/a	i A/cm2	I A	V V	P Watt	η -	cons H2 mol /sec	ln (i) -	PH2 atm	PO2 atm	T K	Vthermo V	Vext V	ΔV _Ω V	Vcat V	ΔV V
1	0.000622665	0.01000	0.93498	0.00935	0.6353	5.1821E-08	-7.3815	1	1	333	1.1985	0.93498	0.00015	0.93513	0.26337
2	0.031435866	0.50486	0.79308	0.40039	0.5389	2.6163E-06	-3.4598	1	1	333	1.1985	0.79308	0.00776	0.80084	0.39766
3	0.063145807	1.01412	0.75800	0.7687	0.5150	5.2553E-06	-2.7623	1	1	333	1.1985	0.75800	0.01559	0.77359	0.42491
4	0.094422893	1.51643	0.73821	1.11945	0.5016	7.8584E-06	-2.3600	1	1	333	1.1985	0.73821	0.02331	0.76153	0.43697
5	0.125625882	2.01755	0.72134	1.45534	0.4901	1.0455E-05	-2.0744	1	1	333	1.1985	0.72134	0.03102	0.75235	0.44615
6	0.156688667	2.51642	0.70429	1.77228	0.4785	1.3040E-05	-1.8535	1	1	333	1.1985	0.70429	0.03869	0.74297	0.45553
7	0.187867269	3.01715	0.68338	2.06185	0.4643	1.5635E-05	-1.6720	1	1	333	1.1985	0.68338	0.04638	0.72976	0.46874
8	0.219371316	3.52310	0.66404	2.3395	0.4512	1.8257E-05	-1.5170	1	1	333	1.1985	0.66404	0.05416	0.71821	0.48029
9	0.25061208	4.02483	0.64684	2.60343	0.4395	2.0857E-05	-1.3838	1	1	333	1.1985	0.64684	0.06188	0.70872	0.48978
10	0.281962848	4.52832	0.63989	2.89765	0.4348	2.3466E-05	-1.2660	1	1	333	1.1985	0.63989	0.06962	0.70951	0.48899
11	0.312927252	5.02561	0.63691	3.20087	0.4328	2.6043E-05	-1.1618	1	1	333	1.1985	0.63691	0.07726	0.71417	0.48433
12	0.344438771	5.53169	0.62797	3.47371	0.4267	2.8666E-05	-1.0658	1	1	333	1.1985	0.62797	0.08504	0.71301	0.48549
13	0.375399543	6.02892	0.61711	3.72051	0.4193	3.1243E-05	-0.9798	1	1	333	1.1985	0.61711	0.09269	0.70980	0.48870
14	0.40701235	6.53662	0.60658	3.96496	0.4122	3.3874E-05	-0.8989	1	1	333	1.1985	0.60658	0.10049	0.70707	0.49143
15	0.437549709	7.02705	0.59632	4.19037	0.4052	3.6415E-05	-0.8266	1	1	333	1.1985	0.59632	0.10803	0.70435	0.49415
16	0.469134184	7.53430	0.58544	4.41088	0.3978	3.9044E-05	-0.7569	1	1	333	1.1985	0.58544	0.11583	0.70127	0.49723
17	0.500224782	8.03361	0.57231	4.59771	0.3889	4.1631E-05	-0.6927	1	1	333	1.1985	0.57231	0.1235	0.69581	0.50269
18	0.531474471	8.53548	0.56352	4.80988	0.3829	4.4232E-05	-0.6321	1	1	333	1.1985	0.56352	0.13122	0.69474	0.50376
19	0.562431196	9.03265	0.55425	5.00636	0.3766	4.6808E-05	-0.5755	1	1	333	1.1985	0.55425	0.13886	0.69311	0.50539
20	0.593504981	9.53169	0.54390	5.18427	0.3696	4.9395E-05	-0.5217	1	1	333	1.1985	0.54390	0.14653	0.69043	0.50807
21	0.624727377	10.03312	0.53334	5.35105	0.3624	5.1993E-05	-0.4704	1	1	333	1.1985	0.53334	0.15424	0.68758	0.51092
22	0.656057908	10.53629	0.52256	5.50588	0.3551	5.4600E-05	-0.4215	1	1	333	1.1985	0.52256	0.16198	0.68454	0.51396
23	0.687243151	11.03713	0.51258	5.65743	0.3483	5.7196E-05	-0.3751	1	1	333	1.1985	0.51258	0.16968	0.68226	0.51624
24	0.71832939	11.53637	0.50209	5.79228	0.3412	5.9783E-05	-0.3308	1	1	333	1.1985	0.50209	0.17735	0.67944	0.51906
25	0.749123288	12.03092	0.48611	5.84831	0.3303	6.2346E-05	-0.2889	1	1	333	1.1985	0.48611	0.18496	0.67106	0.52744
26	0.780722499	12.53840	0.48111	6.03239	0.3269	6.4976E-05	-0.2475	1	1	333	1.1985	0.48111	0.19276	0.67387	0.52463
27	0.811736924	13.036495	0.46816	6.10311	0.3181	6.7557E-05	-0.2086	1	1	333	1.1985	0.46816	0.20042	0.66857	0.52993
28	0.843158987	13.54113333	0.45790	6.20046	0.3111	7.0172E-05	-0.1706	1	1	333	1.1985	0.45790	0.20817	0.66607	0.53243
29	0.873950187	14.03564	0.45110	6.33145	0.3065	7.2735E-05	-0.1347	1	1	333	1.1985	0.45110	0.21578	0.66687	0.53163
30	0.905595579	14.543865	0.44067	6.40901	0.2994	7.5368E-05	-0.0992	1	1	333	1.1985	0.44067	0.22359	0.66426	0.53424
31	0.936500934	15.040205	0.43202	6.49768	0.2935	7.7940E-05	-0.0656	1	1	333	1.1985	0.43202	0.23122	0.66324	0.53526

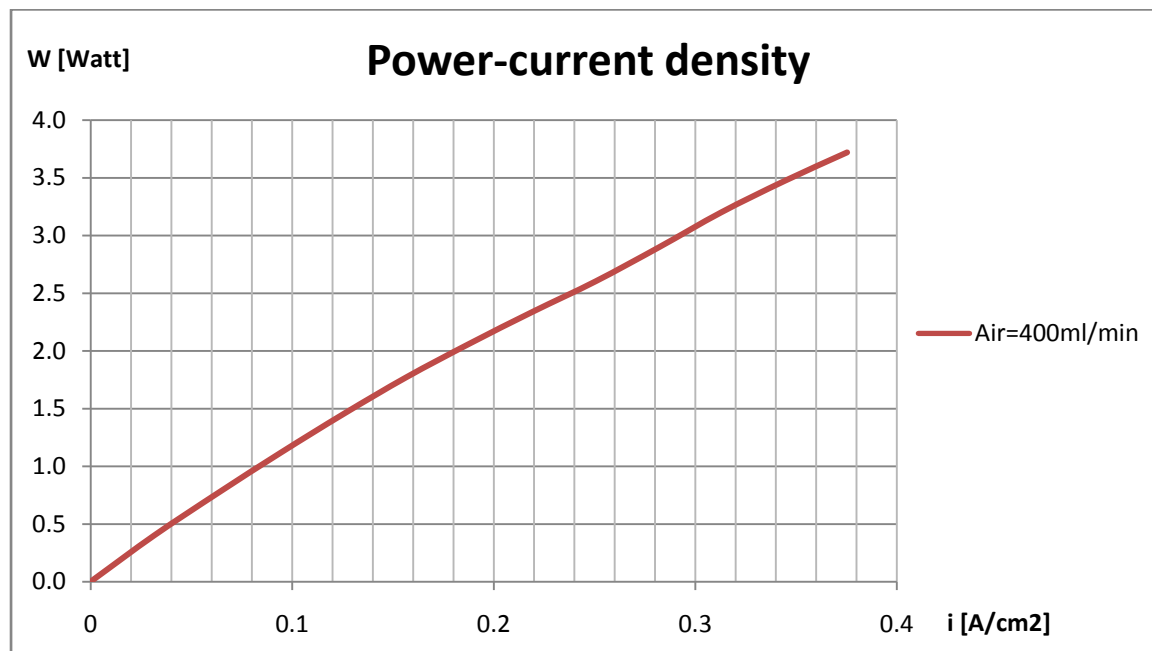
Για να συμπληρωθεί αυτός ο πίνακας υπολογίστηκαν αρχικά από το πείραμα τα μεγέθη I, V και στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα υπόλοιπα μεγέθη σύμφωνα με τις Εξ. (5.1.1)-(5.1.12) που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.1.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Με βάση τον Πίνακα 5.2 και τις σχέσεις (5.1.1)-(5.1.12) χαράσσονται τα παρακάτω διαγράμματα :

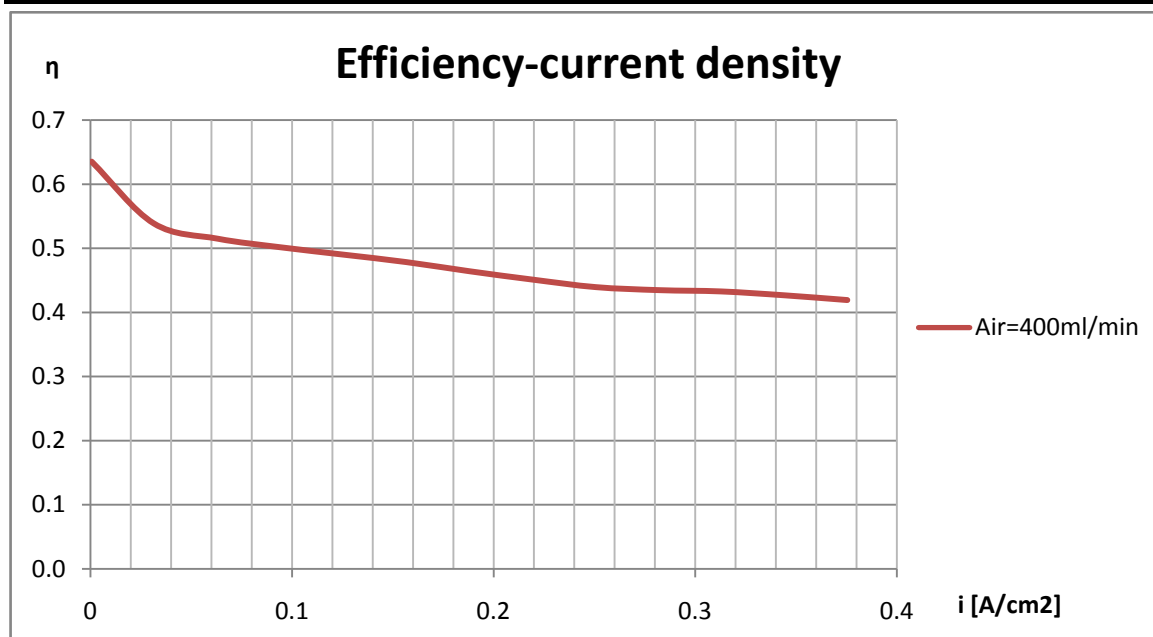


Σχ. 5.5. Καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος για Air=3 st, H₂=2 st.



Σχ. 5.6. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για Air=3 st, H₂=2 st.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο



Σχ. 5.7. Καμπύλη βαθμού απόδοσης-πυκνότητας ρεύματος για Air=3 st, H2=2 st.

Οι υπολογισμοί γίνονται με τον ίδιο τρόπο με αυτό των Εξ. (5.1.14)-(5.1.24) οπότε δεν θα δοθεί ιδιαίτερη έκταση.

Στο Σχ.5.5. έχει σχεδιαστεί η καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος καθώς και το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης αυτής. Από την κλίση της ευθείας αυτής μπορεί να υπολογιστεί η εσωτερική αντίσταση R_{Ω} σύμφωνα με την σχέση :

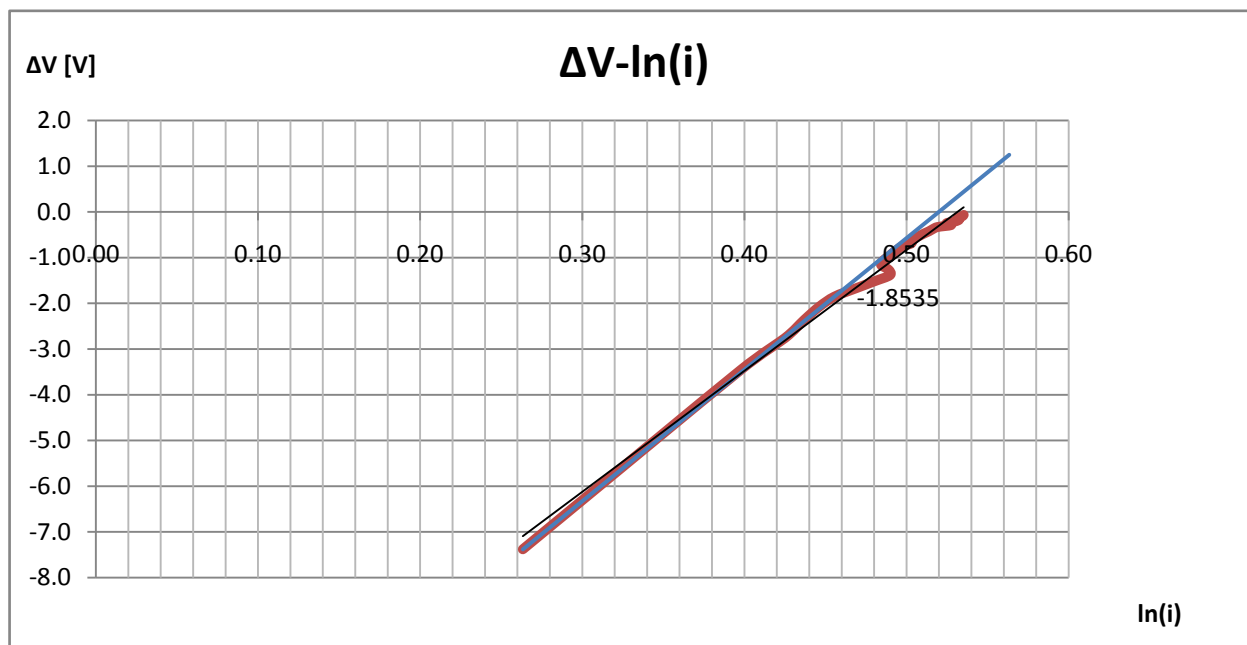
$$R_{\Omega} = \lambda \cdot 0.7 \quad (5.2.1)$$

όπου, λ η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος. Η κλίση αυτή υπολογίζεται ώστε να βρεθεί από το ευθύγραμμο τμήμα η τιμή της ωμικής αντίστασης. Η Εξ. (5.1.13) είναι πειραματική – εμπειρική εξίσωση, που αν αντικαταστήσουμε τα δεδομένα του διαγράμματος έχουμε :

$$R_{\Omega} = \lambda \cdot 0.7 = -(-0.3292) \cdot 0.7 = 0.2469 \text{ Ohm} \quad (5.2.2)$$

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Από τον υπολογισμό του R_{Ω} μπορεί να υπολογιστεί και η ΔV και συμπληρώνεται ο Πίνακας 5.2. Στη συνέχεια σχεδιάζεται το διάγραμμα $\Delta V - \ln(i)$ και υπολογίζονται χαρακτηριστικά μεγέθη,



Σχ. 5.8. Καμπύλη $\Delta V - \ln(i)$ για για Air=3 st, H2=2 st.

Οι Εξ. (5.2.3) - (5.2.6) βασίζονται στην Εξ. (5.1.17) που διέπει όλα τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα τα βήματα στηρίζονται στην λογική των Εξ. (5.1.18)-(5.1.24).

Από την κλίση του ευθύγραμμου κομματιού της καμπύλης και την τομή που έχει με τον άξονα ΔV βρίσκουμε χαρακτηριστικά μεγέθη.

$$\beta = \kappa = 28.7673 \quad (5.2.3)$$

Από το σημείο τομής με τον άξονα ΔV έχουμε :

$$b = -14.9578 \text{ V} \quad (5.2.4)$$

$$i_o^* \cdot P_{O_2}^b = \exp(b) = \exp(-14.9578) = 3.19E-07 \quad (5.2.5)$$

Και εφόσον :

$$P_{O_2}^b = 1 \text{ atm} \quad (5.2.6)$$

Άρα έχουμε:

$$i_o^* = 3.19E-07 \text{ C / s / cm}^2 \quad (5.2.7)$$

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

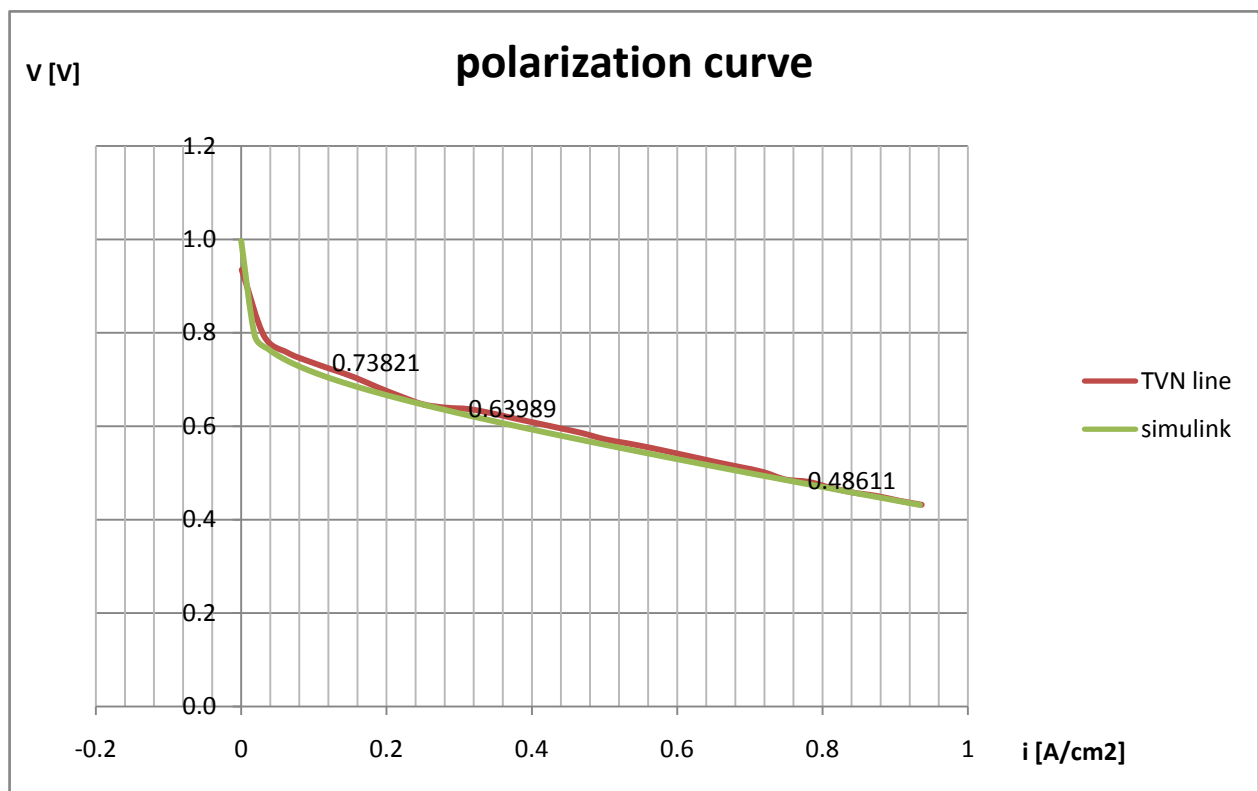
$$a = \beta \cdot \frac{R \cdot T}{F} = 26.7673 \frac{8.314 \cdot 333}{96485.3} = 0.8255 \quad (5.2.8)$$

Αυτές οι τιμές είναι εξαιρετικά κοντά στις τιμές που έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία για κυψέλες καυσίμου για τις δεδομένες συνθήκες.

$$a = 1 \quad (5.2.9)$$
$$i_o = 1.0E-7 - 1.0E-8$$

Σύγκριση με μοντέλο προσομοίωσης

Στην συνέχεια θα γίνει προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο προσομοίωσης έχει λειτουργήσει με δεδομένα τα δεδομένα που έχουν υπολογιστεί από το δεδομένο πείραμα.



Σχ. 5.9. Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με δεδομένα προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Η κόκκινη καμπύλη περιγράφεται με την γενική εξίσωση :

$$V = E - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{act} - \Delta V_{trans}$$
$$V = E - i \cdot r - A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) + m \cdot \exp(n \cdot i) \quad (5.2.10)$$

Υπολογίζουμε με παραμετρική ανάλυση δεδομένων τους συντελεστές (για να επαληθευτούν και να συμπληρωθούν αυτά που έχουν ήδη υπολογιστεί με τα διαγράμματα) :

$$r = 0.375 \text{ kWcm}^2 \Rightarrow R_{\Omega} = 0.263 \text{ Ohm}$$

$$A = -0.0376 \text{ V}$$

$$i_o = 40247376.5 \text{ A/cm}^2$$

$$m = 0.825 \text{ V}$$

$$n = 0.691 \text{ cm}^2\text{mA}^{-1}$$

Από ότι βλέπουμε τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινη γραμμή) συμβαδίζουν με τα δεδομένα της προσομοίωσης, μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις όσον αφορά τις αποκλίσεις :

- Η καμπύλη της προσομοίωσης έχει χαραχθεί με δεδομένα Air=3st, H₂=1.5st ομοίως και η καμπύλη των πειραματικών δεδομένων.
- Δεν παρουσιάζεται έντονα η περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης αντιδρώντων (concentration loss area) αυτό συμβαίνει πιθανότατα λόγω του ότι έχουμε μεγάλη παροχή αντιδρώντων πολλαπλάσια της στοιχειομετρικής οπότε πιθανότατα για αυτό δεν διερχόμαστε ακόμα στην περιοχή αυτή και στην έντονη κλίση της καμπύλης. Ίσως αυτή η περιοχή εμφανιστεί αργότερα σε μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος. Από ότι προκύπτει από την βιβλιογραφία αυτή η περιοχή δεν εξαφανίζεται απλά μετατοπίζεται συναρτήσει της παροχής των αντιδρώντων.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

5.3 Τρίτη ομάδα διαγραμμάτων (Air=3 st, H2=2 st) - custom experiment

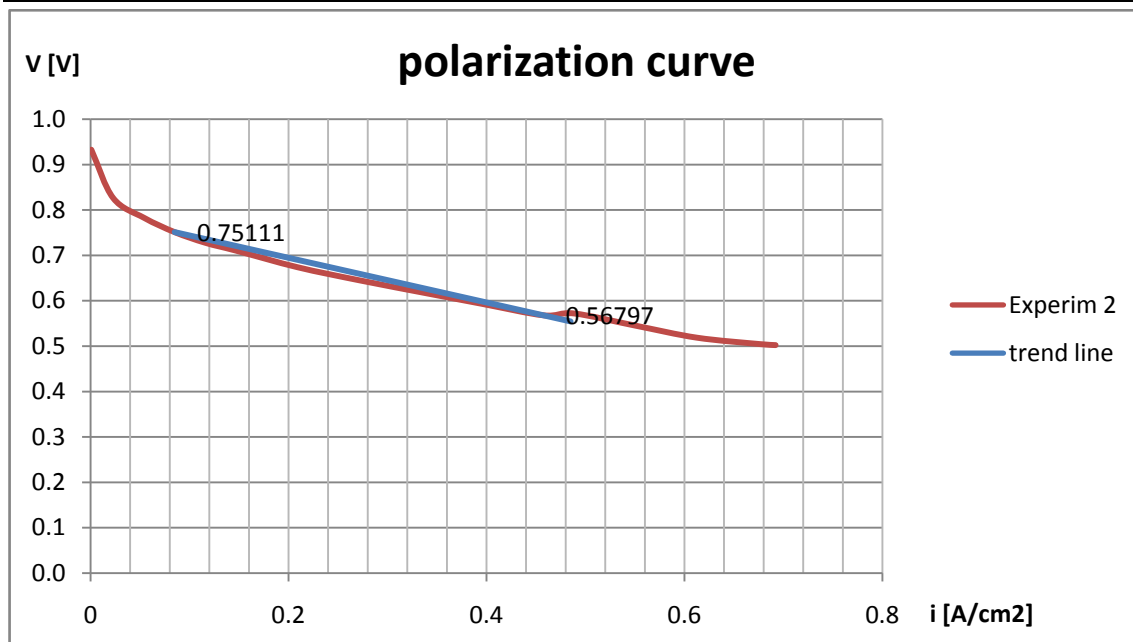
Από τα δεδομένα του πειράματος, τα οποία παρατίθενται και στον Πίνακα 5.3, σχεδιάζονται τα διαγράμματα των Σχ. 5.10 - 5.14 και υπολογίζονται χαρακτηριστικές παράμετροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης των κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 5.3. Δεδομένα πειράματος (Air=3 st, H2=2 st)-custom experiment.

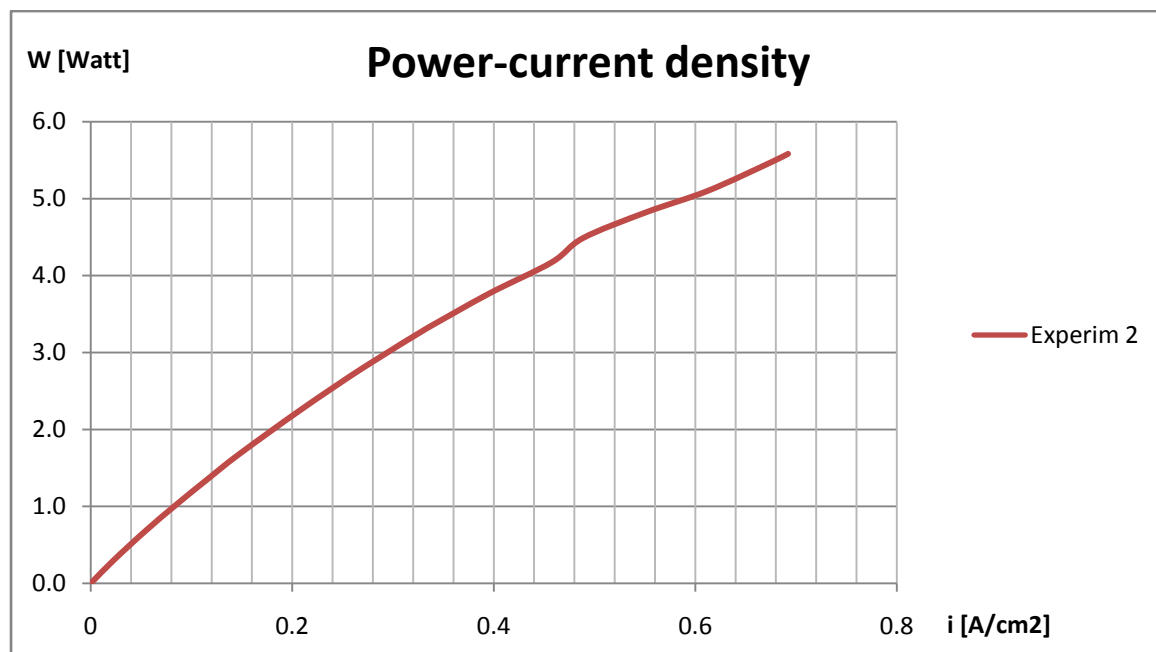
a/a	i	I	V	P	η	cons H2	ln (i)	PH2	PO2	T	Vthermo	Vext	ΔV_{Ω}	Vcat	ΔV
	A/cm2	A	V	Watt	-	mol/sec	-	atm	atm	K	V	V	V	V	V
1	0.000622665	0.01000	0.93281	0.009328	0.6338	5.1821E-08	-7.3815	1	1	333	1.1985	0.93281	0.00023	0.93304	0.26546
2	0.022726183	0.36498	0.82634	0.301598	0.5615	1.8914E-06	-3.7842	1	1	333	1.1985	0.82634	0.008378	0.83471	0.36379
3	0.053997354	0.86720	0.78265	0.678711	0.5318	4.4939E-06	-2.9188	1	1	333	1.1985	0.78265	0.019906	0.80255	0.39595
4	0.084940535	1.36415	0.75111	1.024626	0.5104	7.0692E-06	-2.4658	1	1	333	1.1985	0.75111	0.031313	0.78242	0.41608
5	0.115792497	1.85963	0.72777	1.35338	0.4945	9.6368E-06	-2.1560	1	1	333	1.1985	0.72777	0.042686	0.77046	0.42804
6	0.146797323	2.35757	0.71046	1.674953	0.4827	1.2217E-05	-1.9187	1	1	333	1.1985	0.71046	0.054116	0.76457	0.43393
7	0.20897307	3.35611	0.67390	2.261686	0.4579	1.7392E-05	-1.5655	1	1	333	1.1985	0.67390	0.077037	0.75094	0.44756
8	0.271184776	4.35523	0.64522	2.810074	0.4384	2.2569E-05	-1.3050	1	1	333	1.1985	0.64522	0.099971	0.74519	0.45331
9	0.333518836	5.35631	0.61892	3.315118	0.4205	2.7757E-05	-1.0981	1	1	333	1.1985	0.61892	0.12295	0.74187	0.45663
10	0.333518836	5.35631	0.61892	3.315118	0.4205	2.7757E-05	-1.0981	1	1	333	1.1985	0.61892	0.12295	0.74187	0.45663
11	0.333518836	5.35631	0.61892	3.315118	0.4205	2.7757E-05	-1.0981	1	1	333	1.1985	0.61892	0.12295	0.74187	0.45663
12	0.395430573	6.35062	0.59326	3.767597	0.4031	3.2910E-05	-0.9278	1	1	333	1.1985	0.59326	0.145773	0.73904	0.45946
13	0.457531445	7.34796	0.56797	4.173449	0.3859	3.8078E-05	-0.7819	1	1	333	1.1985	0.56797	0.168666	0.73664	0.46186
14	0.488610367	7.84708	0.57202	4.488675	0.3887	4.0665E-05	-0.7162	1	1	333	1.1985	0.57202	0.180123	0.75214	0.44636
15	0.5507349	8.84480	0.54509	4.821243	0.3704	4.5835E-05	-0.5965	1	1	333	1.1985	0.54509	0.203025	0.74812	0.45038
16	0.612729296	9.84043	0.51865	5.103735	0.3524	5.0994E-05	-0.4898	1	1	333	1.1985	0.51865	0.225879	0.74453	0.45397
17	0.6762967	10.86133	0.50457	5.480311	0.3428	5.6285E-05	-0.3911	1	1	333	1.1985	0.50457	0.249313	0.75388	0.44462
18	0.692030666	11.11401	0.50233	5.582904	0.3413	5.7594E-05	-0.3681	1	1	333	1.1985	0.50233	0.255113	0.75744	0.44106

Για να συμπληρωθεί αυτός ο πίνακας υπολογίστηκαν αρχικά από το πείραμα τα μεγέθη I, V και στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα υπόλοιπα μεγέθη σύμφωνα με τις Εξ. (5.1.1)-(5.1.12) που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.1. Με βάση τον Πίνακα.5.3 και τις Εξ. (5.1.1)-(5.1.12) χαράσσονται τα παρακάτω διαγράμματα των Σχ.5.10-5.12:

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

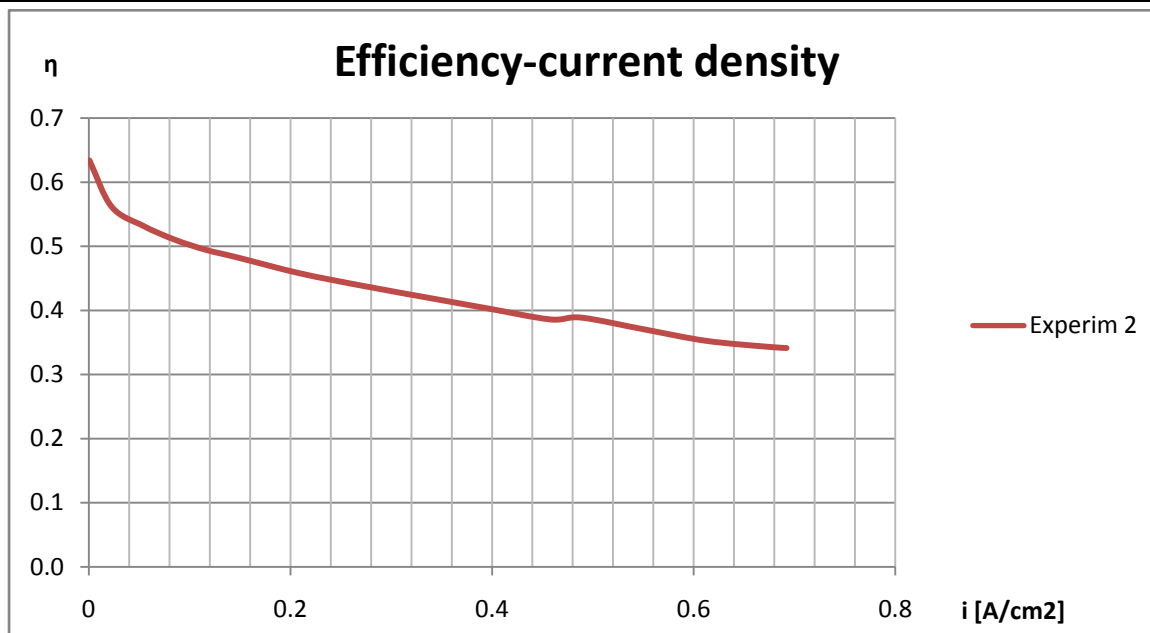


Σχ. 5.10. Καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος για Air=3 st, H₂=2 st.



Σχ. 5.11. Καμπύλη Ισχύος-πυκνότητας ρεύματος για Air=3 st, H₂=2 st.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο



Σχ. 5.12. Καμπύλη βαθμού απόδοσης-πυκνότητας ρεύματος για Air=3 st, H2=2 st.

Οι υπολογισμοί γίνονται με τον ίδιο τρόπο με αυτό των Εξ. (5.1.14)-(5.1.24) οπότε δεν θα δοθεί ιδιαίτερη έκταση.

Στο Σχ. 5.10. έχει σχεδιαστεί η καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος καθώς και το ευθύγραμμο κομμάτι της καμπύλης αυτής. Από την κλίση της ευθείας αυτής μπορεί να υπολογιστεί η εσωτερική αντίσταση R_{Ω} σύμφωνα με την σχέση :

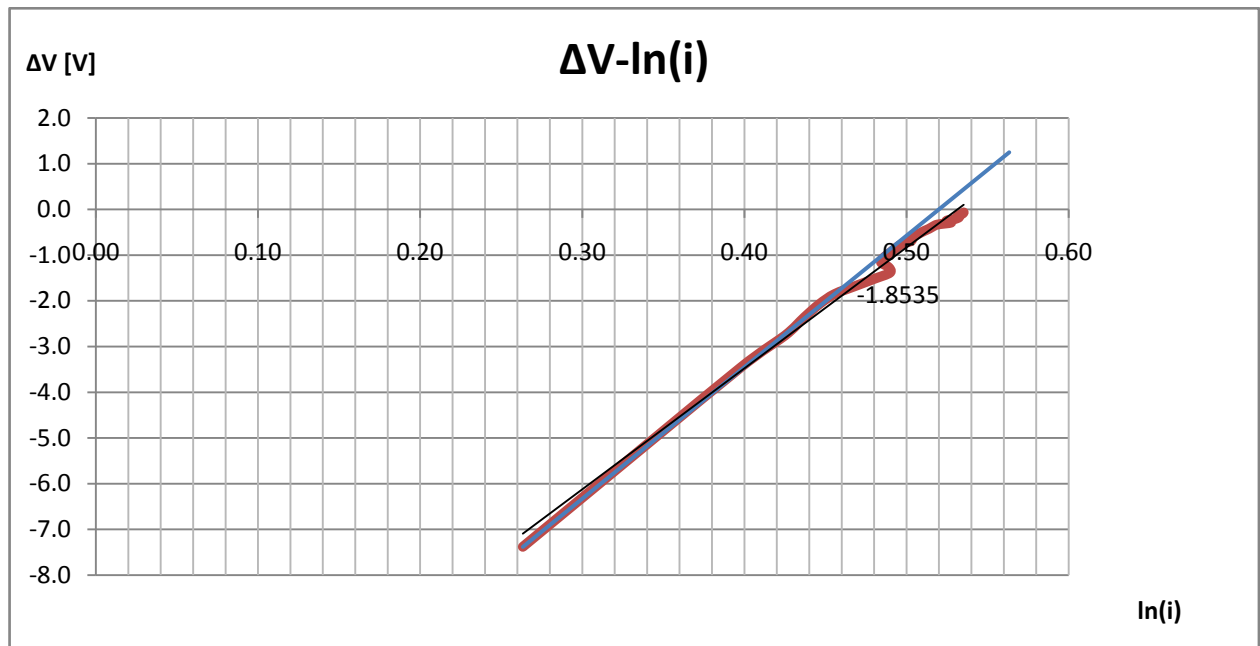
$$R_{\Omega} = \lambda \cdot 0.7 \tag{5.3.1}$$

Η οποία είναι πειραματική εξίσωση, που αν αντικαταστήσουμε τα δεδομένα του διαγράμματος έχουμε :

$$R_{\Omega} = \lambda \cdot 0.7 = -(-0.4915) \cdot 0.7 = 0.368 \text{ Ohm} \tag{5.3.2}$$

Από τον υπολογισμό του R_{Ω} μπορεί να υπολογιστεί και η ΔV και συμπληρώνεται και ο Πίνακας 5.3. Στην συνέχεια σχεδιάζεται το διάγραμμα $\Delta V - \ln(i)$ και υπολογίζονται χαρακτηριστικά μεγέθη.

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο



Σχ. 5.13. Καμπύλη $\Delta V - \ln(i)$ για Air=3 st, H2=2 st.

Οι Εξ. (5.2.3) - (5.2.6) βασίζονται στην Εξ. (5.1.17) που διέπει όλα τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα τα βήματα στηρίζονται στην λογική των Εξ. (5.1.18)-(5.1.24).

Από την κλίση του ευθύγραμμου κομματιού της καμπύλης και την τομή που έχει με τον άξονα ΔV βρίσκουμε χαρακτηριστικά μεγέθη.

$$\beta = \kappa = 32.638 \quad (5.3.3)$$

Από το σημείο τομής με τον άξονα ΔV έχουμε :

$$b = -16.0457 \quad (5.3.4)$$

$$i_o^* \cdot P_{O_2}^b = \exp(b) = \exp(-16.0457) = 1.08E - 07 \quad (5.3.5)$$

Και εφόσον :

$$P_{O_2}^b = 1 \text{ atm} \quad (5.3.6)$$

Άρα έχουμε:

$$i_o^* = 1.08E - 07 \text{ C / s / cm}^2 \quad (5.3.7)$$

$$a = \beta \cdot \frac{R \cdot T}{F} = 32.638 \frac{8.314 \cdot 333}{96485.3} = 0.9365 \quad (5.3.8)$$

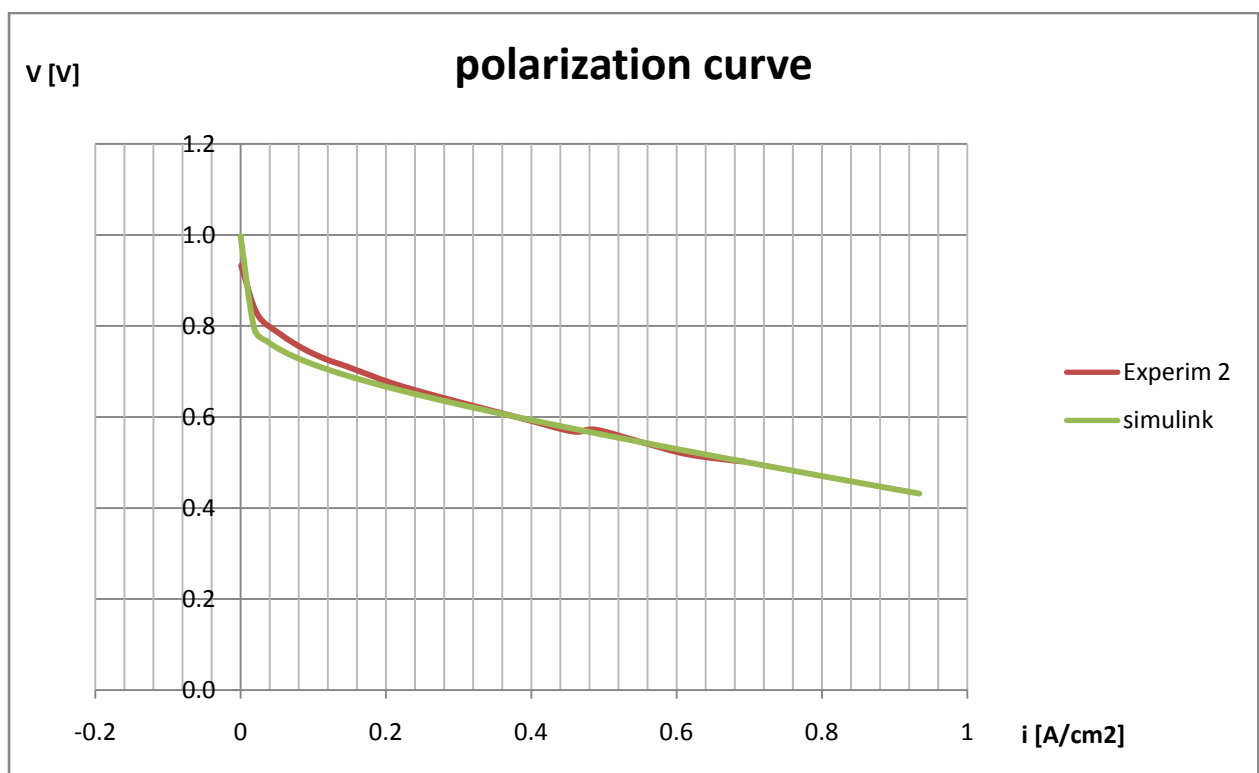
Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

Αυτές οι τιμές είναι εξαιρετικά κοντά στις τιμές που έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία για κυψέλες καυσίμου για τις δεδομένες συνθήκες.

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ i_o &= 1.0E-7 - 1.0E-8 \end{aligned} \tag{5.3.9}$$

Σύγκριση με μοντέλο προσομοίωσης

Στην συνέχεια θα γίνει προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο προσομοίωσης έχει λειτουργήσει με δεδομένα τα δεδομένα που έχουν υπολογιστεί από το δεδομένο πείραμα.



Σχ.5.14. Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με δεδομένα προσομοίωσης

Η κόκκινη καμπύλη περιγράφεται με την γενική εξίσωση :

$$\begin{aligned} V &= E - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{act} - \Delta V_{trans} \\ V &= E - i \cdot r - A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) + m \cdot \exp(n \cdot i) \end{aligned}$$

Υπολογίζουμε με παραμετρική ανάλυση δεδομένων τους συντελεστές (για να επαληθευτούν και να συμπληρωθούν αυτά που έχουν ήδη υπολογιστεί με τα διαγράμματα) :

Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και συσχέτιση με το αναλυτικό μοντέλο

$$r = 0.448 \text{ kWcm}^2 \Rightarrow R_{\Omega} = 0.3136 \text{ Ohm}$$

$$A = -0.0325 \text{ V}$$

$$i_o = 5.061\text{E} - 010 \text{ A / cm}^2$$

$$m = 0.667 \text{ V}$$

$$n = 0.412 \text{ cm}^2\text{mA}^{-1}$$

Από ότι βλέπουμε τα πειραματικά δεδομένα (κόκκινη γραμμή) συμβαδίζουν με τα δεδομένα της προσομοίωσης, ενώ ισχύουν και εδώ οι παρατηρήσεις που γράφονται στο τέλος της Ενότητας 5.2.

Κεφάλαιο 6

Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για τη συνέχιση και βελτίωση της εργασίας

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό της διπλωματικής εργασίας είναι χρήσιμο να παρατεθούν κάποια γενικά συμπεράσματα:

Το δοκιμαστήριο κυψελών καυσίμου RU-2101 παρουσίαζε σε γενικές γραμμές ασταθή συμπεριφορά και έτσι δεν ήταν δυνατό να εκτελεστούν πειράματα σε όλο το εύρος της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης – πυκνότητας ρεύματος της κυψέλης καυσίμου. Τα πειράματα που εκτελέστηκαν είχαν ως όριο το $I=10A$ ενώ μετά την τιμή αυτή η συσκευή παρουσίαζε μια μη επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά, για την οποία αδυνατώ να δώσω μια συγκροτημένη επιστημονική ή τεχνική εξήγηση. Έτσι παρόλο του ότι εκτελέστηκε ένα σύνολο πειραμάτων, τα συνολικά πειραματικά δεδομένα δεν καλύπτουν το διάστημα $i=0-1A/cm^2$ το οποίο απαιτείται για την πλήρη χάραξη της χαρακτηριστικής τάσης – πυκνότητας ρεύματος (polarization curve), η οποία είναι κρίσιμη για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς μιας κυψέλης καυσίμου. Τα πειράματα, στα οποία μελετώνταν η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων συναρτήσε των θερμοκρασιών, δεν ήταν δυνατό να εκτελεστούν ικανοποιητικά αν εξαιρέσουμε τις τιμές για $I=0-7A$ (που είναι και το εύρος των προδιαγραφόμενων πειραμάτων της TVN στο εγχειρίδιο) γιατί, λόγω της απουσίας ψυκτικής εγκατάστασης, δεν ήταν δυνατό να κρατηθεί σταθερή μια τιμή θερμοκρασίας. Επιπλέον, οι τιμές του βήματος σε μια βηματική σκάλα ρεύματος δεν ήταν αυτές που καθόριζε ο μελετητής αλλά μεταβάλλονταν χαοτικά σε ένα πείραμα κατά κάποιο ποσοστό μεγαλύτερο ή μικρότερο από την επιλεγμένη από τον μελετητή τιμή. Επιπρόσθετα τα μετρητικά που έχει το δοκιμαστήριο εγκατεστημένα δεν είναι ακριβή για τις απαιτήσεις της συσκευής αυτής, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι στα πειράματα θερμοκρασιών οι σημαντικές αποκλίσεις (της τάξης του 15-25%) των μετρούμενων θερμοκρασιών. Οι ρυθμιστές πίεσης έχουν βαθμονομημένο ένα κυκλικό κομμάτι μετάλλου, το οποίο δεν είναι σταθερά τοποθετημένο στο βάθος του οργάνου το οποίο και δυσχεραίνει την ρύθμιση της πίεσης εμποδίζοντας την κίνηση της βελόνας του μετρητή συμπίεσης. Έτσι θα χαρακτήριζα τέλος τη συσκευή εξαιρετικά ευαίσθητη. Μια πρόσθετη δυσκολία οφείλεται στην απουσία τεχνικής αντιπροσωπίας που θα μπορούσε να παράσχει τεχνική βοήθεια σε περίπτωση βλάβης ή ελαττωματικής λειτουργίας.

Το μοντέλο προσομοίωσης έχει γενικά σχετική σύμπτωση τιμών με τις πειραματικές μετρήσεις. Αυτό σημαίνει κατά αρχήν ότι δεδομένου ότι μοντέλο έχει ελεγχθεί με τιμές της βιβλιογραφίας οι πειραματικές τιμές ίσως είναι μακροσκοπικά αποδεκτές. Λαμβάνοντας βέβαια υπόψη τα λεχθέντα της προηγούμενης παραγράφου προκαλείται αμφισβήτηση στα δεδομένα που ήδη έχουμε λάβει.

6.2 Προτάσεις για τη συνέχιση και βελτίωση της εργασίας

Στο σημείο αυτό μπορούν να συγκεντρωθούν κάποιες παρατηρήσεις και προτάσεις ώστε να συνεχιστεί η εργασία αυτής της διπλωματικής :

Το δοκιμαστήριο κυψελών καυσίμου χρειάζεται τις απαραίτητες επεμβάσεις, ώστε να μπορεί να εκτελεί ο μελετητής πειράματα κατά το δοκούν. Κατά τη δική μου εκτίμηση το ηλεκτρικό φορτίο ίσως έχει κάποια βλάβη και απαιτείται να αντικατασταθεί. Αν θέλουμε την περαιτέρω αναβάθμιση του δοκιμαστηρίου μπορεί να εγκατασταθεί εξωτερική ψύξη με θερμοστάτη ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία στα πειράματα. Σε περίπτωση που πραγματοποιηθούν αυτές οι αλλαγές, μπορεί να γίνουν ξανά τα πειράματα για όλο το εύρος των χαρακτηριστικών τιμών και να συγκριθούν με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Η συμπεριφορά της συσκευής θα μπορούσε να γίνει πλήρως κατανοητή με την διενέργεια πολλών πειραμάτων σχεδιασμένων από τον μελλοντικό μελετητή, καθώς και η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην λειτουργία της, κάτι το οποίο δεν ήταν δυνατό λόγο τεχνικών προβλημάτων στην παρούσα εργασία. Είναι πολύ ενδιαφέρον και χρήσιμο να έχουμε κατανοήσει την συμπεριφορά μιας κυψέλης καυσίμου ως αυτόνομης μονάδας ώστε να μπορέσουμε μελλοντικά να την εντάξουμε σε ένα πιο περίπλοκο ενεργειακό σύστημα στο πλαίσιο κάποιας εργασίας.

Στη μελλοντική χρονική στιγμή που θα συγκεντρωθεί μια ολοκληρωμένη βάση πειραματικών δεδομένων θα μπορούσε να σχεδιαστεί βελτιστοποίηση της λειτουργίας της σε πρώτο επίπεδο ως αυτόνομης μονάδας και σε δεύτερο επίπεδο να μελετηθεί η αλληλεπίδρασή της με τα υπόλοιπα βοηθητικά μηχανήματα.

Τέλος, ενδιαφέρον θα ήταν στην περίπτωση επισκευής του δοκιμαστηρίου, ο πειραματισμός με συστοιχίες άνω των 3 κυψελών μιας και υπάρχει δυνατότητα αλλαγής συστοιχίας. Ίσως θα ήταν ενδιαφέρον και η φόρτιση της συσκευής με κάποιο πραγματικό φορτίο και η εξέταση και των δυναμικών φαινομένων κατά την είσοδο ή έξοδο του φορτίου από το σύστημα.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Φραγκόπουλος Χ. Α. (2007)**, “Ενεργειακά συστήματα πλοίου”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Φραγκόπουλος Χ. Α. (2007)**, “Βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Νάκος Γ.Λάμπρος (2006)**, «Ανάπτυξη στατικού και δυναμικού μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης για ναυτικές εφαρμογές», τεχνική έκθεση στα πλαίσια του προγράμματος Πυθαγόρας, Αθήνα.

Ξένα Βιβλιογραφία

- Larminie J. and Dicks A. (2003)**, «Fuel Cell Systems Explained», Second Edition, WILEY.
- Blomen Leo J. M. J. and Mugerwa N. Michael**, «Fuel Cell Systems», Plenum Press-New York and London, 1987.
- Franco Barbir (2005)**, «PEM Fuel Cells: Theory and Practice», Elsevier Academic Press, USA.
- Knobbe M. W. and Trung Van Nguyen (2004)**, “Operation and Education manual of RU-2102 Proton exchange Membrane Fuel Cell Experiment”, TVN systems, Inc., Oregon.
- Nakos G. Lambros (2002)**, “Simulation of a PEM Fuel cell System for Onboard Application”, Athens.
- Amphlett J. C. (1995/A)**, “Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell-I-Mechanistic Model Development”.

